

JONI HEIKKILÄ
TAMPEREEN RANTATUNNELISSA ESIINTYVÄN AEROSOLIN
HIUKKASPITOISUUDET, HIUKKASKOKOJAKAUMAT JA
OPTISET OMINAISUUDET

Diplomityö

Tarkastajat: Assoc. Prof. Topi Rönkö ja Prof. Miikka Dal Maso

Jätetty tarkastettavaksi 27. huhtikuuta 2019

TIIVISTELMÄ

JONI HEIKKILÄ: Tampereen Rantatunnelissa esiintyvän aerosolin hiukkaspitoisuudet, hiukkaskokojakaumat ja optiset ominaisuudet

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 63 sivua, 1 liitesivu

Huhtikuu 2019

Teknis-luonnontieteellinen tutkinto-ohjelma

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastajat: Assoc. Prof. Topi Rönkkö ja Prof. Miikka Dal Maso

Avainsanat: aerosoli, ekstinktio, lukumääräkokojakauma ja -pitoisuus, katupöly, näkyvyys

Tässä diplomityössä mitattiin Tampereen Rantatunnelissa esiintyvän aerosolin hiukkaspitoisuuksia, hiukkaskokojakaumia ja optisia ominaisuuksia talviolosuhteissa. Näiden tietojen perusteella pyrittiin selvittämään, kuinka lämpötila, ilman suhteellinen kosteus, tunnelin pesun ajankohta ja tunnelin tuuletus vaikuttavat tunneli-ilman ekstinktion. Tunnelissa suoritettiin mittauksia 8.1. - 8.3.2018 välisenä aikana, jolloin ELPI-mittalaite mittasi tunnelissa. Tällöin suoritettiin myös neljä mobiililaboratoriomittausta TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratoriolla. Käytössä oli myös tunnelin kiinteä mittauslaitteisto, joka mittasi tunneli-ilman virtausnopeutta, ekstinktiota, CO :ta ja NO_2 :ta.

Tunneli-ilmassa havaittiin olevan paljon massallisesti isoja hiukkasia. Hiukkaskoosta päätellen nämä hiukkaset olivat todennäköisesti katupölyä. Hiukkasten massapitoisuus ja lukumääräpitoisuus kasvoi tunnelin loppua kohti saavuttaen maksimiarvonsa juuri ennen tunnelin loppua. Massapitoisuus tunnelissa oli suurimmillaan noin $1500 \mu m/m^3$ ja lukumääräpitoisuus noin $2.7 \cdot 10^5 \# / cm^3$.

Tunnelissa havaittiin mittausjakson aikana ekstinktion arvoja väliltä 0.2 - 2 1/km. ELPI:n datasta laskettu hiukkasten aiheuttama teoreettinen ekstinktio oli huomattavasti pienempi kuin tunnelin sensoreiden mittaama ekstinktio. Tunnelissa oli mahdollisesti paljon yli $10 \mu m$:n kokoisia katupölyhiukkasia, joita ELPI ei pystynyt mittaamaan. Tällä oletuksella arvioitiin, että katupölyllä on 82 %:n vaikutus kokonaisekstinktion ja liikenteen pakokaasupäästöillä on 18 %:n vaikutus kokonaisekstinktion. Tunnelissa havaittiin myös hyvin suuria mustan hiilen pitoisuuksia. Pitoisuus oli tunnelissa suurimmillaan jopa yli $7000 ng/m^3$. Havaittiin myös, että suurin osa ekstinktiosta johtuu valon sironnasta ja absorptiolla oli vain pieni vaikutus kokonaisekstinktion.

Ilman suhteellisen kosteuden ollessa pieni tunneli-ilman ekstinktio oli suurimmillaan ja kosteuden kasvaessa ekstinktio pieneni. Myös tunneli-ilman ja tienpinnan lämpötilalla havaittiin olevan vaikutusta tunnelissa vallitsevaan ekstinktion. Ekstinktio oli suurimmillaan pienillä lämpötiloilla ja laski lämpötilan noustessa kohti $0^\circ C$ astetta. Yli $0^\circ C$:n asteen lämpötiloissa riippuvuus oli kuitenkin erilainen, sillä näissä lämpötiloissa ekstinktio kasvoi lämpötilan kasvaessa. Ekstinktion käyttäytymiseen negatiivisilla lämpötiloilla ei löydetty lopullista selitystä. Mahdollisesti katupölyn määrä kasvaa tunneli-ilmassa kylmissä olosuhteissa tai tunneli-ilmaan muodostuu jääsumua liikenteen pakokaasujen jäähtyessä. Tunnelin pesulla havaittiin olevan vain pieni vaikutus tunneli-ilman ekstinktion. Tunnelin tuuletusta tehostamalla ekstinktio pieneni 5% - 40%.

ABSTRACT

JONI HEIKKILÄ: Particle concentration, particle size distribution and optical properties of aerosol in the Tampere Rantatunneli

Tampere University

Master of Science Thesis, 63 pages, 1 Appendix page

April 2019

Master's Degree Programme in Science and Engineering Technology

Major: Advanced Engineering Physics

Examiner: Assoc. Prof. Topi Rönkkö ja Prof. Miikka Dal Maso

Keywords: aerosol, extinction, particle size distribution and concentration, road dust, visibility

In this thesis, particle concentration, particle size distribution and optical properties of aerosol were measured in Tampere Rantatunneli during winter months. The aim of the thesis was to find out how the temperature, the relative humidity of the air, the time of tunnel washing and tunnel ventilation affect to the extinction of the tunnel air. Measurements were performed 8.1.-8.3.2018, when the ELPI measuring device measured in the tunnel. During this time, there were four mobile laboratory measurements using TUT Aerosol Physics Laboratory's mobile laboratory. Tunnel's other measurement devices were also available, and they measured tunnel air flow rate, extinction, CO and NO_2 .

Lot of high mass particles were measured in the tunnel air. Judging from the particle size, those particles were most likely road dust. Particle mass and number concentration increased towards the end of the tunnel, reaching its maximum value just before the end of the tunnel. Particle mass concentration was at its highest at $1500 \mu m/m^3$ and number concentrations was it highest at $2.7 \cdot 10^5 \# / cm^3$.

Extinction values of 0.2-2 1/km were measured in the tunnel air during the measurements. Theoretical extinction calculated by data from ELPI was notably lower than extinction measured by tunnel sensors. It is possible, that in the tunnel air there was a lot of road dust particles with diameter over $10 \mu m$ that ELPI cannot measure. With this assumption, it was estimated that road dust has a 82 % effect on total extinction, and traffic exhaust have an 18 % effect on total extinction. High concentration of black carbon was also measured in the tunnel air. The maximum concentration of the black carbon was over $7000 ng/m^3$. It was also found that most of the extinction is due to light scattering, and absorption has only small effect on the total extinction.

When the relative humidity of the air was low, extinction of the tunnel air was at its highest and as relative humidity increased, extinction decreased. Tunnel air and road surface temperature were also found to affect the extinction in the tunnel. Extinction was at its highest at low temperatures and decreased when temperature increased towards $0^\circ C$. When temperature was over $0^\circ C$, the dependency was different. With temperatures over $0^\circ C$, the extinction increased as the temperature increased. No definitive explanation for behaviour of extinction at sub-zero temperatures was not found. Potential explanations is increased road dust concentration in cold temperatures or formation of ice crystals when traffic exhaust cools down. Washing of the tunnel had only a minor effect to the tunnel air extinction. By boosting tunnel ventilation extinction decreased by 5% to 40%

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopiston Aerosolifysiikan laboratoriossa. Tutkimus tehtiin tiiviissä yhteistyössä ELY-keskuksen, Destian ja Liikenneviraston kanssa. Tutkimuksen rahoitti ELY-keskus.

Kiitokset sujuvasta yhteistyöstä ELY-keskukselle, erityisesti Heikki Koskelle mittauskampanjan toteuttamisen kanssa. Kiitokset Destian Pasi Villgrenille kaikista kyydeistä tunnelin sisuksiin. Kiitokset Kari Korpelalle sujuvasta yhteistyöstä Liikenneviraston suuntaan. Kiitokset myös Destian Rauno Kuuselalle, HSY:n Jarkko Niemelle ja Ympäristöministeriön Kaarle Kupiaiselle hyvistä mielipiteistä ja opastuksesta. Kiitokset FMI:n Hilikka Timoselle etalometrin lainasta mittausten ajaksi.

Mittausten tekeminen on aina ryhmätöitä. Kiitokset kaikille mittauksiin osallistuneille avusta ja neuvoista. Erityisesti haluan kiittää diplomi-insinööri Mia Isotaloa, jonka apu oli korvaamatonta mittausten aikana. Kiitokset myös diplomi-insinööri Anssi Järviselle mittauksissa avustamisesta. Kiitokset apulaisprofessori Topi Rönkölle työn ohjaamisesta ja hyvistä neuvoista läpi koko mittausten ja työn kirjoittamisen. Kiitokset pitkäaikaiselle esimiehelleni professori Miikka Dal Masolle, joka on opastanut minua aerosolifysiikan saloihin.

Kiitokset Hiukkaselle ja Haineuvostolle kaikista niistä mahtavista hetkistä ja kokemuksista. Kiitokset kaikille kavereille, jotka ovat antaneet hyvää vastapainoa opiskeluille ja töille. Kiitokset avopuolisolleni Riinalle loputtomasta tuesta ja kannustuksesta. Lopuksi haluan kiittää vanhempiani, heidän tuki ja kannustus on ollut korvaamatonta läpi elämäni.

Enää ei satu päähän.

Tampereella, 27.4.2019

Joni Heikkilä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	AEROSOLIEN OPTISET OMINAISUUDET	3
2.1	Rayleighin approksimaatio	8
2.2	Mie-teoria.....	9
2.3	Aerosolien vaikutus näkyvyyteen	11
3.	LIIKENTEEEN AIHEUTTAMAT PÄÄSTÖT	15
3.1	Yleistä liikenteen aiheuttamista päästöistä	15
3.2	Katupöly.....	16
3.3	Liikenteen päästöt tunneliympäristössä	17
4.	MITTAUKSET JA MENETELMÄT	19
4.1	Tampereen Rantatunneli	19
4.2	Mittauksissa käytetty laitteisto.....	20
4.2.1	Hiukkasten jakaumaa ja kokonäismäärää mittaava laitteisto.....	20
4.2.2	Kaasuja mittaava laitteisto	21
4.2.3	Etalometri	22
4.2.4	Tampereen Rantatunnelin ilmanlaadun tarkkailu	23
4.2.5	Mobiililaboratorio.....	24
4.3	Pitkäaikaismittaukset Tampereen Rantatunnelissa	26
4.4	Mobiililaboratoriomittaukset Tampereen Rantatunnelissa	27
4.5	Sääolosuhteet ja liikennemäärä tunnelissa mittausten aikana.....	29
4.6	Tulosten käsittely	31
5.	TULOKSET.....	33
5.1	Tunnelissa mitatut hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuudet sekä hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumat.....	33
5.2	Tunnelissa mitatun aerosolin optiset ominaisuudet	39
5.3	Rantatunnelin tuuletuksen, pesun ja meteorologisten parametrien vaikutus tunneli-ilman ekstinktion	45
5.3.1	Liikenteen vaikutus tunneli-ilman ekstinktion	45
5.3.2	Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus tunneli-ilman ekstinktion	46
5.3.3	Lämpötilan vaikutus tunneli-ilman ekstinktion	47
5.3.4	Rantatunnelin pesun vaikutus tunneli-ilman ekstinktion.....	49
5.3.5	Rantatunnelin tuuletuksen vaikutus ekstinktion	50
5.4	Tulosten keskihajonnasta	52
6.	YHTEENVETO.....	55
	LÄHTEET.....	58
	LIITE A: NO_2 :N, CO_2 :N JA BC:N KESKIHAJONTA.....	64

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Mie-teorian avulla lasketut Q_{ext}, Q_{sir} ja Q_{abs}. Hiukkasen taitekertoimenä käytetty $1.73 + 0.086i$ ja valon aallonpituutena 660 nm. Kuvaajat on piirretty käyttämällä Christina Mätzlerin Matlab-funktioita. (Mätzler 2002).....</i>	10
Kuva 2.	<i>Valon heijastuminen hiukkasesta. Mukaillen Gebhart (2005)</i>	11
Kuva 3.	<i>Näkyvyyteen vaikuttavat tekijät: (1) valo kohteen taustasta; (2) aerosolikerroksen sirottama valo havaitsijalle; (3) kohteesta heijastunut valo, joka saavuttaa havaitsijan; (4) valo kohteesta, joka sirotaan ilmakehän aerosolista pois havaitsijan näkökentästä. Mukaillen Seinfeld & Pandis (2016).</i>	12
Kuva 4.	<i>Kaaviokuva Tampereen Rantatunnelista. Tunnelin sisällä olevat nuolet kuvaavat katossa olevia siirtoilmapuhaltimia. A- ja B-tunnelin ulostuloaukon kohdalla on kaksi poistoilmapuhallinta, jotka imevät ilmaa poistopiippuihin. Lisäksi molemmissa tunneleissa on keskellä yksi poistoilmapuhallin, joka imee ilmaa tunnelin keskeltä. Kuvassa on myös esitettyä tunnelissa olevat mittauspisteet, joita on yhteensä viisi kappaletta kummassakin tunnelissa. Yhdessä mittauspisteessä mitataan ainoastaan ilman nopeutta (kuvassa m/s). Kaikissa muissa mittauspisteissä mitataan ilman nopeuden lisäksi CO- pitoisuutta (kuvassa CO), NO₂ pitoisuutta (kuvassa NO₂) sekä näkyvyyttä (kuvassa PM).</i>	19
Kuva 5.	<i>Tunnelissa mitattu lämpötila Atalassa mitatun lämpötilan funktiona aikavälillä 01.01.-30.03.2018</i>	24
Kuva 6.	<i>TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratorio ja tässä tutkimuksessa käytetty mittalaitteisto. Kuvassa esitettyjen dimensioiden lisäksi mobiililaboratorio on 2 metriä leveä.</i>	25
Kuva 7.	<i>Kaaviokuva Tampereen Rantatunnelin B-putken IV-konehuoneesta. Katkoviivat kuvassa kuvastavat ilmavirtauksen kulkua ilmanvaihtokanavissa.</i>	26
Kuva 8.	<i>B-tunnelin tiesääaseman mittaama ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vuorokausikeskiarvo koko mittausten aikana</i>	29
Kuva 9.	<i>A- ja B-tunnelin liikennemäärien keskimääräinen tuntikeskiarvo arkipäivisin sekä viikonloppuisin tammi-maaliskuussa.</i>	30
Kuva 10.	<i>Pitkäaikaismittauksissa käytetyn ELPI:n mittaama hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumien keskiarvot mittausten aikana Tampereen Rantatunnelista.</i>	33

Kuva 11.	<i>Mobiililaboratoriomittausten aikana mitatut ja samaan aikaan pitkäaikaismittauksissa mitatut a) hiukkasten lukumääräkojakauma päivällä 21.2. b) hiukkasten massakojojakauma päivällä 21.2. c) hiukkasten lukumääräkojakauma yöllä 20.2. d) hiukkasten massakojojakauma yöllä 20.2. Mobiililaboratoriomittausten osalta kuvassa on otettu mukaan vain tunnelin 100 viimeisen metrin matkalla tehdyt mittaukset.</i>	34
Kuva 12.	<i>Kuvassa ELPI:n mittaama a) hiukkasten massapitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona b) hiukkasten massapitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona c) hiukkasten lukumääräpitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona d) hiukkasten lukumääräpitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona. Tunnelin alku on 0 metrin kohdalla ja loppu on 2300 metrin kohdalla.</i>	35
Kuva 13.	<i>ELPI:n mittaama tunneli-ilman hiukkasten massakojojakauma etäisyyden funktiona. Y-akselilla on hiukkaskoko, x-akselilla etäisyys tunnelin alusta. Väri kuvaa hiukkasten massapitoisuutta (mitä punaisempi, sitä suurempi pitoisuus sillä hiukkaskoolla). Kuvan oikealla puolella on esitetty A-tunnelin tulokset ja vasemmalla puolella B-tunnelin tulokset. Ylärivissä on ensimmäisten kahden mobiililaboratoriomittausten tulokset ja alarivillä on kahden jälkimmäisen mobiililaboratoriomittausten tulokset.</i>	36
Kuva 14.	<i>Tunneli-ilman hiukkasten lukumääräpitoisuus B-tunnelissa a) PSM:n mittaamana b) CPC:n mittaamana sekä hiukkasten lukumääräpitoisuus A-tunnelissa c) PSM:n mittaamana ja d) CPC:n mittaamana.</i>	37
Kuva 15.	<i>Kuvassa on (a) CO₂-pitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona (b) CO₂-pitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona (c) NO_x-pitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona (d) NO_x-pitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona. Tunnelin alku on 0 metrin kohdalla ja loppu 2300 metrin kohdalla.</i>	38
Kuva 16.	<i>Rantatunnelin sensoreiden mittaama ekstinktio sekä ELPI:n datasta teoreettisesti laskettu ekstinktion vuorokausikeskiarvo tammi-maaliskuun ajalta. Sensori, jonka data on esitetty, on A- ja B-tunnelien kolmas sensori ajosuuntaan. ELPI:n datasta on eritelty aika, jolloin ELPI oli sijoitettuna poistoilmakanavaan sekä poistokammioon.</i>	39
Kuva 17.	<i>Eri komponenttien osuus kokonaisekstinktiioon aikavälillä 14.2.-8.3. B-tunnelissa</i>	40
Kuva 18.	<i>Eri komponenttien osuus kokonaisekstinktiosta a) päivisin (06:00-21:00) b) öisin (21:00-06:00) aikavälillä 14.2.-8.3. B-tunnelissa</i>	41
Kuva 19.	<i>Tunneli-ilman BC-pitoisuus a) B-tunnelissa ja b) A-tunnelissa jälkimmäisten mobiililaboratoriomittausten aikana.</i>	42

Kuva 20.	<i>Ekstinktiiovakio, absorptiiovakio ja sirontavakio a) B-tunnelissa yöllä 20.2. b) B-tunnelissa päivällä 21.2. c) A-tunnelissa yöllä 20.2. d) A-tunnelissa päivällä 21.2. etäisyyden funktiona. Sirontavakio on saatu vähentämällä ekstinktiiovakiosta absorptio. Absorptiiovakio on määritetty etalometrin datasta ja ekstinktiiovakio ELPI:n datasta 30 nm - 10 µm:n kokoisille hiukkasille.</i>	43
Kuva 21.	<i>Alle 1 µm:n kokoisten hiukkasten aiheuttama ekstinktiiovakio, absorptiiovakio ja sirontavakio a) B-tunnelissa yöllä 20.2. b) B-tunnelissa päivällä 21.2. c) A-tunnelissa yöllä 20.2. d) A-tunnelissa päivällä 21.2. etäisyyden funktiona. Sirontavakio on saatu vähentämällä ekstinktiiovakiosta absorptiiovakio. Absorptiiovakio on määritetty etalometrin datasta ja ekstinktiiovakio ELPI:n mittaamien alle 1 µm:n kokoisten hiukkasten lukumääräkokojakaumista.</i>	44
Kuva 22.	<i>a) Ekstinktio b) liikennemäärä B-tunnelissa kolmelle erilaiselle päivälle.</i>	46
Kuva 23.	<i>Tunneli-ilman ekstinktio ilman suhteellisen kosteuden funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Kuvassa on myös sovite. Katkoviivat kuvaavat sovitteen virherajoja.</i>	46
Kuva 24.	<i>Kuvassa on esitettyä ekstinktio tienpinnan lämpötilan funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa sekä ekstinktio ilman lämpötilan funktiona c) B-tunnelissa d) A-tunnelissa. Katkoviivat kuvaavat sovitteen virherajoja.</i>	47
Kuva 25.	<i>Tunneli-ilman ekstinktio Atalassa mitatun ilman lämpötilan funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Kuvissa on eriteltynä yli 0°C ja alle 0°C asteen lämpötilat.....</i>	48
Kuva 26.	<i>a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa mitattu tunneli-ilman ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona. Kuvissa on esitettyä sovite koko datalle.</i>	49
Kuva 27.	<i>a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa mitattu ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona. Kuvissa on esitettyä sovitteet eri lämpötilaväleille.</i>	50
Kuva 28.	<i>Ekstinktion muutos eri kellonaikoina tuuletuksen tehostuessa a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Prosenttien ollessa positiivisia ekstinktio oli kasvanut, kun tuuletusta tehostettiin ja prosenttien ollessa negatiivisia ekstinktio oli pienentynyt, kun tuuletusta tehostettiin.</i>	51
Kuva 29.	<i>Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden aikasarja aikaväliltä 03.03.-13.03. Kuvassa on esitetty toisen viikon tuuletustestit, viikon ensimmäinen tuuletustesti punaisella katkoviivalla ja viikon jälkimmäinen mustalla katkoviivalla.....</i>	52
Kuva 30.	<i>ELPI:n mittaama hiukkasten a) lukumääräkokojakauma b) massakokojakauma keskihajontoineen. Data on mitattu aikavälillä 14.2.-8.3....</i>	53

Kuva 31.	a) ELPI:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta b) ELPI:n mittaama tunneli-ilman massapitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta c) PSM:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta c) CPC:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta mobiililaboratoriomittauksissa päivällä 21.2. B-tunnelissa.	54
Kuva 32.	B-tunnelin näkyvyys aikaväliltä 1.1.-4.4.2018. Pylväät on luokiteltu kolmeen ryhmään lämpötilan mukaan: alle -10 °C asteen lämpötilat, lämpötilat -10 °C asteen ja -5 °C asteen välissä ja yli -5 °C asteen lämpötilat. Jokaisessa lämpötilaluokassa on pylväät yöolosuhteille (18:00-06:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80%, yöolosuhteille ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80%, päiväolosuhteille (06:00-18:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80% ja päiväolosuhteille ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80%. Vertikaaliset pystyviivat kuvastavat eri näkyvyysluokkia (alle 1 km erittäin huono, 1-4 km huono, 4-10 km kohtalainen, yli 10 km hyvä).	57
Kuva 33.	Mobiililaboratoriomittauksissa 21.2. B-tunnelissa mitatun a) NO ₂ :n b) CO ₂ :n pitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta	64
Kuva 34.	Mobiililaboratoriomittauksissa 21.2. B-tunnelissa mitatun BC-konenstraation keskiarvo ja keskihajonta	64

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

BC	Musta hiili (engl. <i>Black Carbon</i>)
CPC	Kondensaatiolaskuri (engl. <i>Condensation Particle Counter</i>)
ELPI	Sähköinen alipaineimpaktori (engl. <i>Electrical Low Pressure Impactor</i>)
$PM_{2.5}$	Alle 2.5 μm hiukkasten massapitoisuus
PM_{10}	Alle 10 μm hiukkasten massapitoisuus
PSM	Hiukkaskoonkasvattaja (engl. <i>Particle Size Magnifier</i>)

Kirjaintunnukset

a	Ångströminparametri
B	Luminesenssi
b	Takaisinsirontakerroin
C	Kontrasti
E_{ext}	Massaekstinktiotehokkuus
I	Intensiteetti
k_{abs}	Absorptiovakio
k_{ext}	Ekstinktiiovakio
k_{sir}	Sirontavakio
L_v	Näkyvyys
Q_{abs}	Absorptiotehokkuus
Q_{ext}	Ekstinktiotehokkuus
Q_{sir}	Sirontatehokkuus
x	Kokoparametri
ε	Kontrastikynnys
τ	Optinen tiheys
σ_{abs}	Absorptiopinta-ala
σ_{ext}	Ekstinktiopinta-ala
σ_{sir}	Sirontapinta-ala
ρ	Tiheys

1. JOHDANTO

Aerosoli koostuu kaasumaisesta väliaineesta ja siinä leijuvista nestemäisistä ja kiinteistä hiukkasista. Aerosolissa väliainetta kutsutaan kantokaasuksi ja hiukkasia aerosolihiukkasiksi. Aerosolihiukkasen koko vaihtelee suuresti, tyypillinen aerosolihiukkanen on kooltaan $1 \text{ nm} - 100 \text{ }\mu\text{m}$ (Hinds 1982). Aerosolihiukkasia voi päätyä ilmakehään monien erilaisten prosessien vaikutuksesta. Osa näistä aerosolihiukkasista on peräisin ihmisten toiminnasta (esimerkiksi teollisuuden päästöt) ja osa luonnollisista lähteistä (esimerkiksi puiden siitepöly). Nämä aerosolihiukkaset vaikuttavat meidän kaikkien elämään monin eri tavoin. Aerosolihiukkasilla on merkittävä vaikutus niin maapallon ilmastoon kuin ihmisten terveyteenkin. Ilmakehässä olevat aerosolihiukkaset ovat välttämätön edellytys pilvien muodostumiselle niiden toimiessa tiivistymisytiminä. Pilvillä on taas suuri vaikutus maapallon säteilytasapainoon, joten aerosolihiukkasilla on merkitystä maapallon säteilytasapainossa (Hyslop 2009). Ilmastovaikutusten lisäksi aerosolihiukkasilla on havaittu haitallisia terveysvaikutuksia. Korkean hiukkaspitoisuuden, hengityselinsairauksien, sydän- ja verisuonitautien ja kuolleisuuden välillä on havaittu yhteys (Pöschl 2005).

Monet ilmakehän näyttävistä ilmiöistä, kuten kauniit auringonlaskut ja sateenkaaret, johtuvat aerosolihiukkasten vuorovaikutuksesta valon kanssa (Hinds 1982). Aerosolihiukkaset vuorovaikuttavat valon kanssa sirottamalla tai absorboimalla sitä. Auringonlasku näyttää punaiselta, koska kaikki sininen valo siroaa ilmakehästä pois, ja jäljelle jää punaista valoa. Musta savu näyttää mustalle, sillä savussa olevat hiukkaset absorboivat kaiken näkyvän valon. Vastaavasti tiheät sadepilvet näyttävät mustalle, sillä pisaroiden aiheuttama sironta on niin täydellistä, että valo ei pääse pilven läpi. Absorption ja sironnan lisäksi eräs tärkeä termi on ekstinktio, joka kertoo kuinka paljon valo vaimenee tiettyssä matkassa. Ekstinktio on sidoksissa hyvin vahvasti näkyvyyden kanssa. Näkyvyys kertoo, kuinka kauas voi nähdä tiettyyn suuntaan (Hinds 1982; Hyslop 2009). Kirkkaina päivinä näkyvyys voi olla jopa yli 300 km, mutta huonoimmillaan näkyvyys voi olla vain muutamia satoja metrejä (Hyslop 2009). Aerosolihiukkasista aiheutuva näkyvyyden aleneminen voi olla ongelma erityisesti tiiviisti asutetuilla seuduilla. Suomessa näkyvyyden alenemista voi havaita erityisesti keväisin, jolloin lumien sulaessa paljon katupölyä päätyy ilmaan (Kupiainen & Tervahattu 2004).

Aerosolihiukkasia tutkitaan usein pitoisuuksien avulla. Haastavaksi aerosolihiukkasten tutkimisen tekee se, että hiukkasten lukumääräpitoisuudet vaihtelevat huomattavasti eri ympäristöissä ja ilmakehän hiukkaset ovat lähes aina keskenään erikokoisia eli ne ovat polydispersejä. Jotta eri tilanteita voitaisiin vertailla järkevästi toisiinsa, käytetään aerosolien tutkimiseen avuksi kokojakaumia. Normaleissa olosuhteissa lognormaali jakauma tai useiden lognormaalien jakaumien summa kuvaa parhaiten hiukkasten kokojakaumaa (Hinds

1982). Tämä hiukkasten kokojakauma voidaan määrittää hiukkasten massan, pinta-alan tai lukumäärän suhteen. Näiden kokojakaumien huippuarvot eli moodit ovat keskittyneet aina tiettyyn hiukkaskokoon. Yleisimmät hiukkasmoodit ilmakehässä ovat nukleaatiomoodi (1-20 nm), Aitken-moodi (20-100 nm), akkumulaatiomoodi (100-1000 nm, usein ajoneuvojen päästöistä puhuttaessa tätä moodia kutsutaan nokimoodiksi) ja karkea moodi (1-50 μm) (Hinds 1982).

Tampereen Rantatunneli on 2.3 km pitkä maantietunneli Tampereen Näsijärven rannassa. Talviaikaan tunnelissa on havaittu näkyvyysongelmia, koska tunnelin loppupäähän alkaa muodostua silmin havaittavaa harmahtavaa sumua. Tätä sumua on havaittu erityisen paljon erityisesti kuivina pakkaspäivinä. Tässä työssä tarkoitus oli tutkia Rantatunnelissa esiintyvää hiukkaspitoisuutta, hiukkaskokojakaumaa sekä aerosolihiukkasten optisia ominaisuuksia erilaisten mittausten avulla. Lisäksi selvitettiin, mitkä parametrit vaikuttavat tunneli-ilmassa vallitsevaan ekstinktion. Erityisesti tunnelin ilmastoinnin, lämpötilan, kosteuden ja tunnelin pesun vaikutusta ekstinktion tutkittiin. Aerosolimittauksia suoritettiin tunnelissa vuoden 2018 alkupuolella. Mittalaitte, joka mittasi tunneli-ilman hiukkasten lukumääräkokojakaumaa, oli sijoitettuna tunneliin 08.01.-08.03.2018. Lisäksi suoritettiin neljä mobiililaboratoriomittausta TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratoriolla. Näiden mittausten aikana mobiililaboratoriolla ajettiin tunnelissa, samalla mitaten tunneli-ilmaa usealla eri mittalaitteella. Näiden mittausten lisäksi käytössä oli Rantatunnelissa kiinteästi mitattu ekstinktio, NO_2 , CO , ilmannopeus, tunneli-ilman ja tienpinnan lämpötila sekä tunneli-ilman suhteellinen kosteus.

Aluksi tässä työssä käsitellään aerosolin optisia ominaisuuksia ja esitellään kaikki tärkeät käsitteet liittyen näihin optisiin ominaisuuksiin, jonka jälkeen käsitellään liikenteen aiheuttamia päästöjä. Erityisesti keskitytään katupölyyn ja katupölyn muodostumisen mekanismeihin. Teorian jälkeen esitellään mittausympäristöä ja tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet. Tuloksia käsitellään kolmessa osassa. Ensiksi esitellään tunneli-ilmaasta mitatut hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuudet sekä lukumäärä- ja massakokojakaumat. Tämän jälkeen keskitytään tunneli-ilmaasta mitatun aerosolin optisiin ominaisuuksiin, jonka jälkeen esitellään erilaisten parametrien vaikutusta tunneli-ilmassa vallitsevaan ekstinktion.

2. AEROSOLIEN OPTISET OMINAISUUDET

Tässä kappaleessa esitellään teoriaa liittyen aerosolien optiikkaan. Aerosolien optiikka käydään läpi ekstinktion, absorption ja sironnan kautta. Kappaleen lopussa käsitellään vielä näkyvyyttä ja sitä, miten aerosolihiukkaset vaikuttavat näkyvyyteen.

Aerosolihiukkaset vuorovaikuttavat valon kanssa sirottamalla ja absorboimalla sen energiaa, jolloin valon intensiteetti vaimenee. Valon intensiteetin vaimenemista sen kulkiessa aerosoliväliaineen läpi kutsutaan ekstinktioksi (Hinds 1982). Hiukkasten lisäksi myös jotkut kaasut vaikuttavat ekstinktion, sillä nekin vuorovaikuttavat valon kanssa (Hyslop 2009).

Ekstinktiota kuvataan ekstinktiiovakion k_{ext} avulla. Ekstinktiiovakio kuvaa intensiteetin laskua yksikkömatkan aikana väliaineessa ja sen yksikkö on $(pituus)^{-1}$ (Hinds 1982). Ekstinktio on hiukkasten ja kaasujen aiheuttaman sironnan ja absorption summa, joten ekstinktiiovakio voidaan kuvata näiden summana seuraavan yhtälön mukaisesti (Hyslop 2009)

$$k_{ext} = k_{sir,h} + k_{sir,k} + k_{abs,p} + k_{abs,k}, \quad (2.0.1)$$

jossa $k_{sir,h}$ on hiukkasten sirontavakio, $k_{sir,k}$ kaasun sirontavakio, $k_{abs,h}$ hiukkasten absorptiiovakio ja $k_{abs,k}$ kaasun absorptiiovakio. Kaasujen osuus on yleisesti pienempi kuin hiukkasten, sillä tyypillisesti kaasut vuorovaikuttavat valon kanssa paljon vähemmän kuin hiukkaset (Hyslop 2009). NO_2 on ainoa absorboiva kaasu, jota esiintyy optisesti merkittävässä määrin troposfäärissä. NO_2 absorboi erityisesti sinistä valoa, joten se voi aiheuttaa saastepilvien punaisen, ruskean tai keltaisen värin (Seinfeld & Pandis 2016). NO_2 :n pitoisuudesta voidaan arvoida sen aiheuttamaa absorptiota kaavalla (Pitchford *et al.* 2007)

$$k_{abs,k} = 3.3[NO_2], \quad (2.0.2)$$

jossa $[NO_2]$ on NO_2 :n pitoisuus ppm:nä.

Optisia ominaisuuksia usein karakterisoidaan ekstinktiotehokkuuden Q_{ext} ja ekstinktiopinta-alan σ_{ext} avulla. Ekstinktiopinta-alan yksikkö on m^2 . Voidaan ajatella, että hiukkanen aiheuttaa sen ekstinktiopinta-alan kokoisen "varjon" siihen osuvaan säteilyyn. Tämä voi olla paljon suurempi tai pienempi kuin hiukkasen geometrinen varjo. Ekstinktiopinta-alan ja geometrisen pinta-alan välistä suhdetta kutsutaan dimensiomattomaksi ekstinktiotehokkuudeksi. Vastaavasti voidaan määrittää sironta- ja absorptiotehokkuus sironta- ja absorptio-alan avulla:

$$Q_{ext} = \frac{\sigma_{ext}}{\sigma_{geom}} = \frac{\sigma_{ext}}{\pi d^2} \quad (2.0.3)$$

$$Q_{sir} = \frac{\sigma_{sir}}{\sigma_{geom}} = \frac{\sigma_{sir}}{\pi d^2} \quad (2.0.4)$$

$$Q_{abs} = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{geom}} = \frac{\sigma_{abs}}{\pi d^2}, \quad (2.0.5)$$

jossa πd^2 geometrinen pinta-ala pallomaisille hiukkasille. Ekstinktio on siroinnan ja absorption summa, joten pätee myös

$$Q_{ext} = Q_{sir} + Q_{abs} \quad (2.0.6)$$

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sir} + \sigma_{abs} \quad (2.0.7)$$

Ekstinktiotehokkuus on tyypillisesti suurimmillaan 0.1 -1 μm kokoisille hiukkasille (Hinds 1982). Isoille hiukkasille ($d_p > 2 \mu m$) ekstinktiiovakio lähestyy arvoa kaksi. Tätä kutsutaan *ekstinktioparadoksiksi* ja implikoi, että isot hiukkaset sirottavat ja absorboivat valoa kaksi kertaa siihen osuvaan valoon verrattuna. Tämä tarkoittaa, että ekstinktiopinta-ala σ_{ext} on kaksi kertaa suurempi kuin geometrinen pinta-ala yhtälön (2.0.3) mukaisesti. Kuitenkin geometrisen optiikan mukaan ekstinktiopinta-alan täytyisi olla yhtä suuri kuin geometrinen pinta-ala. Mahdollisia selityksiä ovat säteilyn interferenssi hiukkasen sisällä ja sen takana sekä diffraktio.

Monodispersille aerosolipopulaatiolle voidaan laskea ekstinktiiovakio ekstinktiopinta-alan avulla (Seinfeld & Pandis 2016)

$$k_{ext} = \sigma_{ext} N, \quad (2.0.8)$$

jossa σ_{ext} on ekstinktiopinta-ala. Ekstinktio voidaan myös laskea yksinkertaisen analyttisen yhtälön avulla, joka ottaa huomioon valon aallonpituuden vaikutuksen (Kokhanovsky 2008)

$$k_{ext} = b \lambda^{-a}, \quad (2.0.9)$$

jossa a on Ångströmparametri (muussa kirjallisuudessa käytetään myös termiä ÅngströmmekspONENTTI) ja b antaa arvon ekstinktiovakiolla aallonpituudella $1 \mu m$, jos aallonpituus λ on esitetty mikrometreinä. Tämä yhtälö ei välttämättä ole kaikissa tilanteissa täysin tarkka ja k_{ext} :in riippuvuus aallonpituudesta voi olla eri. Kuitenkin kaava kuvastaa hyvin normaaleja ilmakehän olosuhteita. Tämän takia vakiot a ja b usein mitataan. (Kokhanovsky 2008).

Erityisesti Aerosol Robotic Networkin (AERONET) (Holben *et al.* 1998) avulla pystytään määrittämään Ångströmparametrin a arvo yhdessä monen muun parametrin kanssa. AERONET ei mittaa suoraan ekstinktiokvakiota, vaan aerosolin optista tiheyttä (engl. *aerosol optical thickness AOT*), joka kuvaa väliaineen läpinäkyvyyttä:

$$\tau(\lambda) = \int_0^h k_{ext}(\lambda, z) dz, \quad (2.0.10)$$

missä h ilmakehän suurin korkeus (60 km) and z on korkeus maanpinnalta.

Suurin osa aerosolista on alle 1 km päästä maanpinnasta (Kokhanovsky 2008). Tämän takia kaavasta (2.0.10) voidaan jättää pois riippuvuus korkeudesta, eli saadaan kaava muotoa:

$$\tau(\lambda) = k_{ext}(\lambda)H, \quad (2.0.11)$$

joka voidaan myös esittää muodossa:

$$\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-a}, \quad (2.0.12)$$

jossa $\beta = \tau(1\mu m)$. Tästä voidaan määrittää Ångströmparametrin a arvo. Ångströmparametri kertoo paljon aerosolin ominaisuuksista. Jos a on pienempää kuin yksi, aerosolin kokojakaumaa hallitsevat yli $0.5\mu m$:n kokoiset hiukkaset. Jos taas vakion arvo on suurempi kuin yksi, aerosolin kokojakaumaa hallitsevat alle $0.5\mu m$:n kokoiset hiukkaset.

Ångströmparametri voidaan ratkaista myös sironnalle tai absorptiolle. Jos tiedetään ekstinktio, sironta tai absorptio kahdelle eri aallonpituudelle, voidaan yhtälön (2.0.9) avulla laskea suhde, josta voidaan ratkaista Ångströmparametri:

$$k_x = k_y \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_x} \right)^a, \quad (2.0.13)$$

jossa k_x ja k_y ovat joko ekstinktio-, sironta- tai absorptiokvatioita. Ekstinktion liittyvän Ångströmparametrin lisäksi myös sirontaan liittyvä Ångströmparametri antaa tietoa hiukaspopulaation kokojakaumasta. Yleisesti voidaan sanoa, että jos $a_{sir} > 2$, niin pienet hiukkaset hallitsevat kokojakaumaa ja jos $a_{sir} < 1$, niin isot hiukkaset hallitsevat kokojakaumaa. Tämä johtuu siitä, että pienillä hiukkasilla sironnan riippuvuus aallonpituudesta on suurempi kuin isoilla hiukkasilla. Isoille hiukkasille a_{sir} on lähes nolla, kun taas kaikista pienimmille molekyyleille se on noin 4 (Schuster. *et al.* 2006). Absorption Ångströmparametri ei kerro mitään hiukkasten kokojakaumasta, vaan se antaa tietoa hiukkasten kemiallisesta koostumuksesta. Teoreettisesti mustalle hiilelle a_{abs} arvo on 1, sillä se absorboi kaiken säteilyn miltä tahansa aallonpituudelta. Näitä arvoja on mitattu kokeellisesti urbaaneilta alueilta, joissa on paljon mustaa hiiltä. Suurempia a_{abs} arvoja on mitattu biomassan palamisesta aiheutuvista aerosoleista ja Saharan pölystä (Russell *et al.* 2010).

Polydispersille aerosolipopulaatiolla voidaan laskea ekstinktiokvatio seuraavasti:

$$k_{ext}(\lambda) = \int_0^{D_p^{max}} \pi D_p Q_{ext}(x, m(\lambda)) N(D_p) dD_p, \quad (2.0.14)$$

jossa N on hiukkasten kokonaismäärä, $N(D_p)$ on hiukkaskokojakaumafunktio, D_p^{max} on hiukkaspopulaation suurin hiukkaskoko, $x = 2\pi D_p/\lambda$ on kokoparametri, $m = n - ix$ on taitekerroin ja Q_{ext} on ekstinktiotehokkuus. Jos kyseessä on monodispersi aerosoli, pystytään ekstinktio laskemaan kaavalla

$$k_{ext} = \frac{\pi D_p^2}{4} N Q_{ext} \quad (2.0.15)$$

Usein on myös hyödyllistä ilmaista ekstinktiiovakio massakokojakauman suhteen, jolloin saadaan

$$k_{ext}(\lambda) = \int_0^{D_p^{max}} \frac{3}{2\rho D_p} Q_{ext}(x, m(\lambda)) n_M(D_p) dD_p, \quad (2.0.16)$$

jossa ρ on hiukkasten tiheys sekä n_m massakokojakaumafunktio. Tämä voidaan kirjoittaa

$$k_{ext}(\lambda) = \int_0^{D_p^{max}} E_{ext}(D_p, \lambda, m) n_M(D_p) dD_p, \quad (2.0.17)$$

jossa $E_{ext}(D_p, \lambda, m)$ on massaekstinktiotehokkuus

$$E_{ext}(D_p, \lambda, m) = \frac{3}{2\rho D_p} Q_{ext}(x, m(\lambda)) \quad (2.0.18)$$

Vastaavat yhtälöt voidaan johtaa sironnalle ja absorptiolle. Massaekstinktiotehokkuus kertoo siis kuinka paljon hiukkanen aiheuttaa ekstinktiota per yksikkömassaa kohti.

Yksi tärkeä aerosolihukkasten optisia ominaisuuksia kuvaava suure on yksittäissironta-albedo (engl. Single Scattering Albedo, SSA). Yksittäissironta-albedo kuvaa sironnan ja ekstinktion suhdetta, eli kuinka paljon hiukkanen sirottaa valoa suhteessa ekstinktion.

$$w_0 = \frac{k_{sir}}{k_{ext}} = \frac{k_{sir}}{k_{sir} + k_{abs}}. \quad (2.0.19)$$

Mitä enemmän hiukkanen sirottaa valoa, sitä suurempi w on. Suurin osa ekstinktiosta johtuu siroamisesta, joten yksittäisalbedo saa olosuhteista riippuen arvoja 0.5-0.8 urbaaneissa ympäristöissä ja 0.8-0.95 kaukaisemmilla seuduilla (Seinfeld & Pandis 2016). Esimerkkejä mitatuista arvoista ovat Meksiko Cityssä mitattu 0.82 (Garcia *et al.* 2010), Shanghaissa mitattu 0.81 (Xu *et al.* 2012) ja Amazonilla mitattu 0.9 (Kaufman *et al.* 1992). Yksittäissironta-albedoa voidaan käyttää kuvaamaan aerosolihukkasten lähteitä. Luonnollisista lähteistä peräisin olevat hiukkaset eivät sisällä niin paljon tummaa absorboivaa materiaalia kun teollisista lähteistä peräisin olevat hiukkaset, jotka sisältävät usein paljon absorboivaa materiaalia (Takemura *et al.* 2002).

Absorption osuus kokonaisekstinktiosta on usein pieni, sillä normaaleissa olosuhteissa suurin osa ekstinktiosta johtuu valon sironnasta. Kuitenkin absorptiolla on suuri vaikutus

maapallon säteilypakotteeseen (Stier *et al.* 2007) ja myös näkyvyyteen (Watson 2002). Ilmakehässä suurin osa valon absorptiosta johtuu mustasta hiilestä (joka on suurimmalta osalta nokea) (Horvath 1993). Usein urbaaneilla alueilla on paljon mustaa hiiltä (BC), joten näillä alueilla usein absorptiolla on merkitystä kokonaisekstinktioon (Bond & Bergstrom 2006). Varsinkin maantietunneleissa absorptiolla voi olla suuri vaikutus, sillä tunneleissa on mitattu alhaisia SSA:n arvoja ruuhkien aikaan (Strawa *et al.* 2010). Hiukkasen absorptio määräytyy hiukkasen taitekertoimen, $m = n + ik$ missä n on reaaliasia ja k on imaginääri-nen osa, mukaan. Hiukkanen, jolla on vain reaalinen taitekerroin sirottaa valoa, mutta ei absorboi sitä ollenkaan (Hoosmuller *et al.* 2009). Musta hiili aiheuttaakin paljon absorptiota, sillä sen imaginaariosa k on suuri (0.79 Bond & Bergstrom (2006) mukaan) ja sen taitekerroin ei riipu aallonpituudesta näkyvällä aallonpituusalueella.

Jo esitellyt optiset suureet eivät ota huomioon sironnan kulmariippuvuutta. Sironnan kulmariippuvuutta voidaan kuvata vaihefunktiolla $P(\theta, \alpha, m)$, jossa jollekin kulmalle θ sironnut valon intensiteetti normalisoidaan kaikkiin kulmiin sironneella valolla

$$P(\theta, x, m) = \frac{I(\theta, x, m)}{\int_0^\pi I(\theta, x, m) \sin \theta d\theta}, \quad (2.0.20)$$

jossa $I(\theta, x, m)$ on kulmaan θ sironneen valon intensiteetti. Eräs toinen sironnan kulmaja-kautumiseen liittyvä suure on takaisinsirontakerroin b , joka kuvaa kuinka paljon aerosolista siroaa valoa välillä $90^\circ - 180^\circ$.

$$b = \frac{\int_{\pi/2}^\pi I(\theta, x, m) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi I(\theta, x, m) \sin \theta d\theta}. \quad (2.0.21)$$

Tämä takaisinsirontakerroin on tärkeä, kun määritetään kuinka paljon auringon säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen ilmakehän hiukkasista.

Gustav Mie kehitti 1900- luvun alussa yleisen teorian valon sironnasta hiukkasesta (Mie 1908). Mie-teorian avulla voidaan ratkaista hiukkasen aiheuttama sironta ja absorptio kaikenkokoisille hiukkasille, mutta se on hyvin monimutkainen. Hyvin isojen ja hyvin pienien hiukkasten tapauksissa Mie-teoriaa voidaan approksimoida ja käyttää paljon yksinkertaisempia yhtälöitä. Näin ollen sironta (ja myös absorptio) voidaan jakaa kolmeen osaan kokoparametrin mukaan:

- $x \ll 1$ Rayleighin approksimaatio: Rayleighin approksimaatiolla voidaan ratkaista valon sironta ja absorptio pienille hiukkasille.
- $x \sim 1$ Mie-teoria: Mie-teorian avulla voidaan ratkaista sironta ja absorbtio kaikenkokoisille hiukkasille, mutta se on monimutkainen.
- $x \gg 1$ Geometrinen sironta: Isoille hiukkasille voidaan käyttää geometriaa valon sironnan ratkaisemiseen.

2.1 Rayleighin approksimaatio

Valon aallonpituutta pienempien hiukkasten tapauksessa ($x \ll 1$) voidaan käyttää Rayleighin teoriaa ratkaisemaan valon absorptio ja sironta hiukkasesta. Tämä teoria on paljon yksinkertaisempi kuin Mie-teoria ja se on huomattavasti helpompi ratkaista. Rayleighin alueella löytyvät hiukkaset ovat myös tärkeitä, sillä ne kokevat pienen kokonsa vuoksi pienen gravitaatiovoiman ja niillä voi olla pitkä elinkaari ilmakehässä (Hoosmuller *et al.* 2009). Rayleighin alueen hiukkaset voivat olla myös peräisin suuren lämpötilan palamisprosseista, joten ne voivat vaikuttaa myös absorptioon vahvasti, sillä ne sisältävät paljon mustaa hiiltä (Hoosmuller *et al.* 2009).

Kun valo lankeaa hiukkaseen, jokaisen sirottajan dipolimomentti oskilloi samassa vaiheessa ja samalla taajuudella kuin valo, samalla säteillen ympärilleen. Tämä säteily havaitaan valon siroamisena (Hoosmuller *et al.* 2009) ja sitä kutsutaan *Rayleighin sironnaksi*. Valon absorptio vastaavasti johtuu näiden dipolien menettämästä energiasta ja prosesseista, jotka muuttavat elektromagneettista energiaa termiseksi energiaksi (Hoosmuller *et al.* 2009). Siroamisen vaikutusala σ_{sir} on kaikkien sirottajien amplitudien summa (sirottajan amplitudi on määritelty yksittäisen sirottajan sirontavaikutusalan neliöjuurena) ja sirottajien absorptiovaikutusalat σ_{abs_i} muodostavat koko hiukkasen absorptiopinta-alan σ_{abs} .

$$\sigma_{sir} = \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\sigma_{sir_i}} \right)^2 = (NV)^2 \sigma_{sir_i} = \left(\frac{4}{3} \pi N \right)^2 r^6 \sigma_{sir_i} \quad (2.1.1)$$

$$\sigma_{abs} = \sum_{i=0}^n \sigma_{abs_i} = (NV) \sigma_{abs_i} = \left(\frac{4}{3} \pi N \right) r^3 \sigma_{abs_i}, \quad (2.1.2)$$

jossa n on hiukkasten (sirottajien) lukumäärä, N on lukumäärätiheys ja V on yksittäisen hiukkasen tilavuus. Laskemalla kaavojen (2.0.4 ja 2.0.5) mukaiset sironta- ja absorptiotehokkuudet saadaan:

$$Q_{sir} = \frac{\sigma_{sir}}{\sigma_{geometrinen}} = \frac{16}{9} \pi N^2 r^4 \sigma_{sir_i} = \frac{N^2 x^4}{9 \pi^3} \lambda^4 \sigma_{sir_i}(\lambda), \quad (2.1.3)$$

$$Q_{abs} = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{geometrinen}} = \frac{4}{3} N r \sigma_{abs_i} = \frac{2 N x}{3 \pi} \lambda \sigma_{abs_i}(\lambda), \quad (2.1.4)$$

jossa σ_{sir_i} riippuu aallonpituudesta. Sironta- ja absorptiotehokkuus Q_{sir} riippuu hiukkasen koosta ja aallonpituudesta vain näiden suhteen kautta (kaavoissa 2.1.3 ja 2.1.4) hiukkasen kokoparametri x :n kautta), joten voidaan päätellä, että sirontavaikutusalan täytyy olla verrannollinen $(1/\lambda^4)$:seen sironnan tapauksessa ja $(1/\lambda^1)$ absorbtion tapauksessa (Hoosmuller *et al.* 2009)

$$\sigma_{sir} = (NV)^2 \frac{\lambda_0 \sigma_{sir0}}{\lambda^4} = \left(\frac{4}{3}\pi N\right)^2 r^6 \frac{\lambda_0 \sigma_{sir0}}{\lambda^4} \quad (2.1.5)$$

$$\sigma_{abs} = (NV) \frac{\lambda_0 \sigma_{abs0}}{\lambda} = \left(\frac{4}{3}\pi N\right) r^3 \frac{\lambda_0 \sigma_{abs0}}{\lambda}. \quad (2.1.6)$$

Tämä pitää paikkansa vain alueilla, joilla taitekerroin on riippumaton valon aallonpituudesta. Kaavan (2.1.5) ja (2.1.6) vakiot voidaan määrittää käyttämällä avuksi sopivia yhtälöitä elektromagneettisesta teoriasta (Bohren & Huffman 1998)

$$N^2 \lambda_0^4 \sigma_{sir0} = 24\pi^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}\right)^2. \quad (2.1.7)$$

$$N \lambda_0 \sigma_{abs0} = 6\pi Im \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right), \quad (2.1.8)$$

jossa m on kompleksinen taitekerroin ja Im kuvaa taitekertoimen imaginääriosaa.

Rayleighin sironnan vaihefunktio on muotoa (Seinfeld & Pandis 2016)

$$P(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right)^2 (1 + \cos^2 \theta), \quad (2.1.9)$$

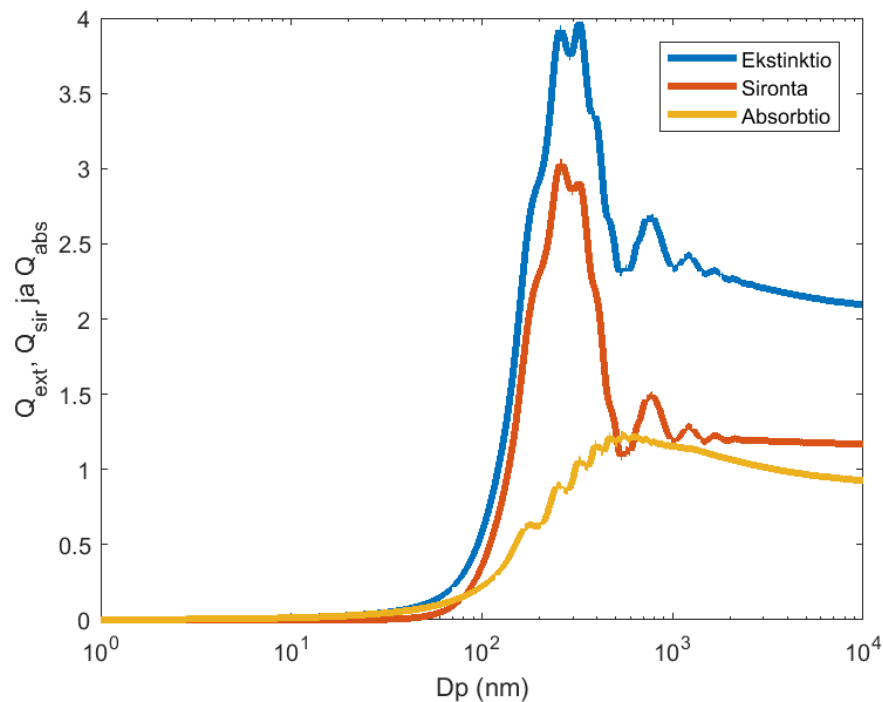
jossa $I(\theta)$ on sironneen valon intensiteetti kulmalle θ etäisyydellä R hiukkasesta. Yhtälöt (2.1.5) ja (2.1.9) implikoivat, että sironnut valo on verrannollinen $(1/\lambda^4)$:seen, eli mitä pienempi valon aallonpituus on, sitä paremmin valo siroaa hiukkasista. Tämä onkin syy miksi taivas näyttää ihmisen silmään siniseltä. Sininen valo siroaa ilmakehän hiukkasista noin 16 kertaa vahvemmin kuin punainen valo, joten sininen valo näyttää tulevan joka puolelta taivasta. Vastaavasti auringonlasku tai -nousu voi värjätä taivaanrannan punaiseksi Rayleighin sironnan takia. Valo joutuu kulkemaan pitkän matkan ilmakehässä, joten kaikki sininen valo on ehtinyt sirota pois ja vain punainen valo saavuttaa ihmisen silmän. Yhtälöstä (2.1.6) havaitaan, että absorboitunut valo on käänteisesti verrannollinen valon aallonpituuteen, eli mitä pienempi valon aallonpituus on, sitä paremmin valo absorboituu hiukkaseen.

2.2 Mie-teoria

Edellä kuvattu Rayleighin teoria on vain approksimaatio Mie-teoriasta, mutta se toimii hyvin pienille hiukkasille. Gustav Mie kehitti Mie-teorian (tunnetaan myös Lorentz-Mie ja Mie-Debye teoriana) Maxwellin elektromagneettisista yhtälöistä ja se pystyy ratkaisemaan minkä tahansa pyöreän ja homogeenisen kappaleen sironnan (Mie 1908). Mie-teorian avulla voidaan ratkaista Q_{ext} , Q_{sca} ja Q_{abs} . Mie-teorian avulla pystytäänkin ratkaisemaan

teoreettiset arvot absorptio-, sironta- ja ekstinktiokertoimelle, jos vain hiukkasten kompleksinen taitekerroin sekä aerosolihiukkasten kokojakauma tiedetään.

Kuvassa 1 on laskettu Mie-teorian avulla absorptio-, sironta- sekä ekstinktiotehokkuuden riippuvuus hiukkasen koosta. Hiukkasen taitekerroina on käytetty $1.73 + 0.086i$, joka on tyypillinen urbaanille aerosolille (Ebert *et al.* 2004), ja valon aallonpituutena 660 nm (punainen). Laskemiseen on käytetty Christina Mätzlerin tekemää Matlab-funktioita (Mätzler 2002).



Kuva 1. Mie-teorian avulla lasketut Q_{ext} , Q_{sir} ja Q_{abs} . Hiukkasen taitekerroina käytetty $1.73 + 0.086i$ ja valon aallonpituutena 660 nm. Kuvaajat on piirretty käyttämällä Christina Mätzlerin Matlab-funktioita. (Mätzler 2002)

Näillä parametreilla hiukkasen ekstinktiotehokkuus alkaa kasvamaan noin 100 nm kohdalla ja suurimmillaan ekstinktio on noin 200-300 nm hiukkasille, kuten myös sirontatehokkuus. Pienillä hiukkasilla ei ole paljoa vaikutusta kokonaisekstinktion. Sirontatehokkuuden arvo on maksimissaan kolme, eli hiukkanen sirottaa kolme kertaa enemmän valoa kuin siihen osuu valoa. Isoilla hiukkasille ekstinktiotehokkuus lähestyy arvoa kaksi, kuten aikaisemmin on todettu.

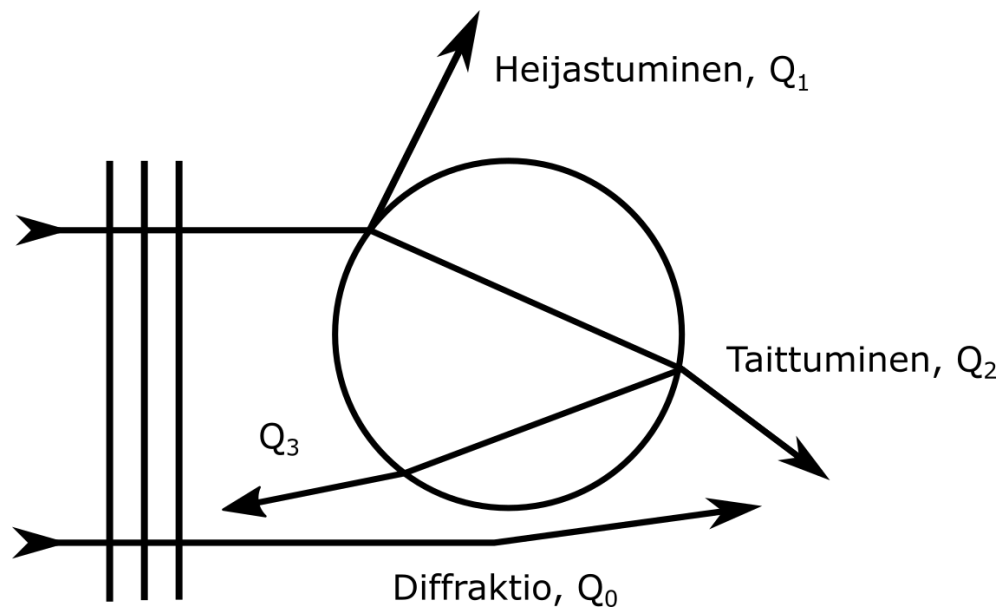
Absorptiotehokkuuden arvo alkaa kasvamaan hieman sirontatehokkuutta myöhemmin ja saakin maksimiarvonsa noin 550 nm kohdalla. Siroamistehokkuus on tällä kokoalueella lähes yhtä suuri kuin sirontatehokkuus, joten yksittäissironta-albedo on noin 0.5. Onkin odotettavaa, että myös absorptio kasvaa suureksi, sillä laskemiseen on käytetty urbaanin aerosolin taitekerrointa, jonka imaginääriosaa on suuri.

Isoille hiukkasille voidaan käyttää klassista geometriaa sironnan ratkaisemiseen. Näillä isoilla hiukkasilla ($x \gg 1$) sironnut valo voidaan ajatella sisältävän kolme eri osaa. Nämä johtuvat valon diffraktiosta, heijastumisesta ja taittumisesta (kuva 2).

Monokromaattiselle valolle siroamistehokkuus Q voidaan kuvata sen osien summana yhtälöllä:

$$Q_s = Q_0(\theta, x) + Q_1(\theta, m) + Q_2(\theta, m) \quad (2.2.1)$$

Hiukkasen sisäiset heijastumiset Q_i ($i > 2$) eivät ole kuvattuna yhtälössä (2.2.1) (Gebhart 2005). Yhtälössä Q_0 on se valon osa, joka diffraktoituu hiukkasesta, Q_1 on hiukkasen pinnasta heijastuneen valon osuus ja Q_2 on valon taittuminen hiukkasesta. Kuvassa 2 on esitettynä nämä mekanismit.

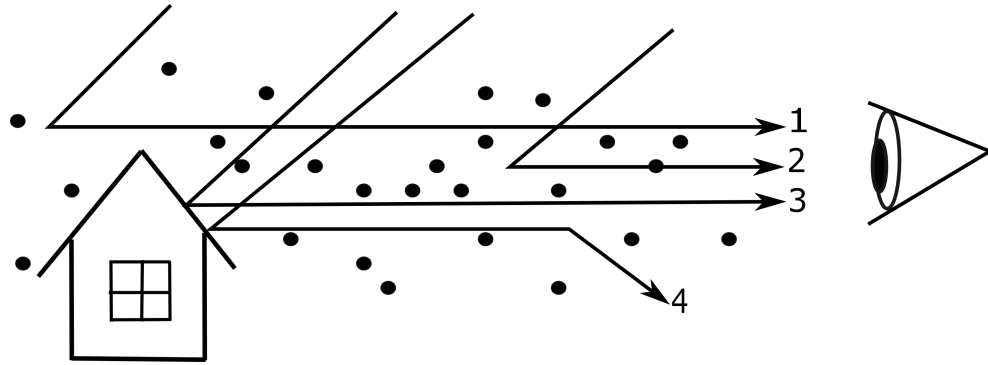


Kuva 2. Valon heijastuminen hiukkasesta. Mukailten Gebhart (2005)

2.3 Aerosolien vaikutus näkyvyyteen

Näkyvyys on subjektiivisesti määritelty termi. Näkyvyydellä tarkoitetaan etäisyyttä, jolloin kaukana oleva kohde pystytään vielä näkemään selvästi. Parempi tieteellinen termi on näkyvyysetaisyys, joka kertoo kuinka kauaksi voi nähdä tiettyyn suuntaan. (Hinds 1982; Hyslop 2009). Selvyyden vuoksi tässä työssä käytettäessä termiä näkyvyys, jolla tarkoitetaan juuri näkyvyysetaisyyttä.

Näkyvyyteen vaikuttavat useat eri tekijät, kuten ilmakehän hiukkasten optiset ominaisuudet, valon määrä, havaittavan kohteen ominaisuudet sekä ihmissilmän ominaisuudet. Myös ilmakehän kaasut vaikuttavat näkyvyyteen, mutta tavanomaisissa olosuhteissa hiukaset vaikuttavat huomattavasti enemmän näkyvyyteen. Näkyvyys huononee, kun aerosoli sirottaa tai absorpoi valoa pois ihmissilmän tieltä tai aerosoli sirottaa valoa muualta ihmissilmään. Tällöin kohteen ja taustan välinen kontrasti pienenee, mikä johtaa näkyvyyden huononemiseen (Seinfeld & Pandis 2016). Kuvassa 3 on esitettynä nämä mekanismit.



Kuva 3. Näkyvyyteen vaikuttavat tekijät: (1) valo kohteen taustasta; (2) aerosolikerroksen sirottama valo havaitsijalle; (3) kohteesta heijastunut valo, joka saavuttaa havaitsijan; (4) valo kohteesta, joka sirotaan ilmakehän aerosolista pois havaitsijan näkökentästä.
Mukaillen Seinfeld & Pandis (2016).

Jotta voidaan ymmärtää näkyvyyden taustalla oleva teoria, täytyy ensin määritellä kontrasti. Luontainen kontrasti voidaan määritellä esineelle, joka on tasaisen taustan edessä:

$$C_0 = \frac{B_0 - B'}{B'}, \quad (2.3.1)$$

jossa B_0 on kohteen luminesenssi ja B' on taustan luminesenssi.

Kun kohteen ja taustan luminesenssi on sama, kontrasti on nolla eikä kohdetta voi havaita. Taustan luminesenssi voi olla suurempi kuin kohteen, joten kontrasti voi olla myös negatiivinen, pienimmillään kontrastin arvo voi olla -1. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa ideaali musta kohde on valkoisen taustan edessä.

Luontaisen kontrastin lisäksi voidaan määritellä havaittu kontrasti, joka on pienempi kuin luontainen kontrasti aerosolihiukkasten aiheuttamasta absorptiosta ja sironnasta johtuen. Tämä havaittu kontrasti voidaan määritellä

$$C_R = \frac{B_R - B'_R}{B'_R}, \quad (2.3.2)$$

jossa B_R ja B'_R ovat kohteen ja taustan havaitut luminesenssit. Tämä vastaa luontaista kontrastia, jos aerosolihiukkasten absorptio ja sironta on pientä kohteen ja havaitsijan välissä.

Tarkasteltaessa jotain kohdetta horisonttia vasten luminesenssin muutos dB johtuen ohuesta kerroksesta dx aerosoleja havainnoijan ja kohteen välissä on

$$\frac{dB}{dx} = -k_{ext}B + B_a, \quad (2.3.3)$$

jossa B on kohteen luminesenssi ohuen kerroksen kohdalla, $k_{ext}B$ on aerosolikerroksen aiheuttaman luminesenssin häviö ja B_a on aerosolikerroksen luminesenssi, joka aiheutuu

aerosolien sirottamasta valosta havainnoitsijalle. Vastaava yhtälö voidaan muodostaa horisontilla, mutta sen luminesenssi ei muutu etäisyyden funktiona, joten dB/dx on pakko olla nolla ja

$$B_a = k_{ext}B' = k_{ext}B'_R, \quad (2.3.4)$$

jossa B'_R on taustan havaittu luminesenssi.

Integroimalla yhtälö (2.3.3) kohteen ja havainnoijan etäisyyden yli saadaan:

$$\int_{B_0}^{B_R} \frac{dB}{B_a - k_{ext}B} = \int_0^L dx, \quad (2.3.5)$$

$$B_R = B'_R(1 - e^{-k_{ext}L}) + B_0e^{-k_{ext}L}, \quad (2.3.6)$$

jossa L on havaitsijan ja kohteen etäisyys. Yhdistämällä yhtälöt (2.3.1), (2.3.3) ja (2.3.6) yhtälöön (2.3.2), saadaan muodostettua Koschmiederin yhtälö:

$$C_R = C_0e^{-k_{ext}L} \quad (2.3.7)$$

Koschmiederin yhtälö kuvaa siis kohteen havaittua kontrastia kohteen ja havaitsijan etäisyyden funktiona, kun kohdetta tarkastellaan horisonttia vasten. Yhtälö (2.3.7) toimii vain erittäin rajoitetuissa olosuhteissa: ilmakehän täytyy olla tasaisesti valaistu, ekstinktiokvotio ei voi riippua paikasta ja kohteen täytyy olla ideaalin musta. Kuitenkin tavanomaisissa olosuhteissa Koschmiederin yhtälö antaa hyviä tuloksia 10 prosentin virherajoilla (Horwath 1967).

Pienintä mahdollista kontrastia, jolloin kohde voidaan vielä havaita, kutsutaan kontrastikynnykseksi ε . Yhtälöä (2.3.7) muokkaamalla saadaan yhtälö kontrastikynnykselle:

$$\varepsilon = \exp(-k_{ext}L_V) \quad (2.3.8)$$

jossa L_V on näkyvyys (näkyvysetäisyys). Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista näkyvyys, joten näkyvyydelle saadaan yhtälö:

$$L_V = \frac{V}{k_{ext}}, \quad (2.3.9)$$

jossa $V = -\ln(\varepsilon)$. Ideaaleissa olosuhteissa (musta kappale horisonttia vasten päivänvalossa) käytetään usein kontrastikynnyksen arvoa 0.02 (Seinfeld & Pandis 2016), jolloin vakion V arvo on 3.9. Usein kuitenkin tilanne on erittäin epäideaalinen. Griffing (1980) määrittämiä empirisesti arvoja tälle vakiolla erilaisissa olosuhteissa ja sai tulokseksi $V = 1.9 \pm 0.4$.

Näkyvän aallonpituuden kokoluokkaa olevat hiukkaset aiheuttavat suurimman osan näkyvyyden alentumisesta ilmakehässä (Seinfeld & Pandis 2016). Koska ekstinktio aiheutuu suurimmalta osin sironnasta, myös näkyvyyden aleneminen aiheutuu pitkälti sironnasta suurimmassa osassa tapauksissa. Urbaaneilla alueilla myös absorption vaikutus voi olla merkittävä. Ilman molekyyliden aiheuttama näkyvyyden aleneminen on useimmissa tilanteissa mitätöntä. Jos näkyvyys on yli 30 km, täytyy myös ilman molekyyliden vaikutus oottaa huomioon (Seinfeld & Pandis 2016).

Kaikista tehokkaimmin (per yksikkömassaa kohti) näkyvyyttä alentavat hiukkaset, joiden koko $0.1 - 1 \mu m$. Tämä johtuu siitä, että massaekstinktiotehokkuus (yhtälö 2.0.18) sekä vastaavasti ekstinktiotehokkuus saavat suurimmat arvonsa tällä kokoalueella. Isot hiukkaset ($d_p \gg \lambda$) vaikuttavat kaikista epätehokkaimmin per yksikkömassa näkyvyyteen. Tarkasteltaessa massasirontatehokkuutta kahdessa ääritapauksessa, $d_p \gg \lambda$ sekä $d_p \ll \lambda$ (Rayleighin sironta), havaitaan mistä tämä johtuu. Rayleighin alueella sirontatehokkuuden riippuvuus hiukkaskoosta on $Q_{sir} \approx d_p^4$ kaavan 2.1.3 mukaisesti. Isoilla hiukkasilla ekstinktiotehokkuus on lähes vakio, kuten kuvasta 1 havaittiin. Kun tämä tieto yhdistetään kaavaan saadaan, että

$$\begin{aligned} E_{sir}(d_p, \lambda, m) &\approx d_p^3 & d_p \ll \lambda \\ &\approx d_p^{-1} & d_p \gg \lambda \end{aligned}$$

$E_{sir}(d_p, \lambda, m) \approx d_p^{-1}$ kun $d_p \gg \lambda$. Eli massasirontatehokkuus kasvaa pienillä hiukkasilla mutta alkaa pienenemään kaikista isoimmilla hiukkasilla. Rayleighin alueella absorptio-
tehokkuus on lineaarisesti riippuvainen hiukkaskoosta kaavan (2.1.4) mukaisesti. Isoilla hiukkasilla absorptio-
tehokkuus ei riipu hiukkaskoosta ollenkaan (Seinfeld & Pandis 2016). Näin saadaan kaavan avulla, että

$$\begin{aligned} E_{abs}(d_p, \lambda, m) &\approx d_p^0 & d_p \ll \lambda \\ &\approx d_p^{-1} & d_p \gg \lambda \end{aligned}$$

Massa-absorptio-
tehokkuus siis pysyy vakiona pienillä hiukkasilla ja laskee isoilla hiukkasilla.

3. LIIKENTEEN AIHEUTTAMAT PÄÄSTÖT

Tässä kappaleessa esitellään liikenteen aiheuttamia päästöjä aerosolifysiikan näkökulmasta. Kappaleessa esitellään myös tunneliympäristöä ja tunneliympäristössä tyypillisiä liikennepäästöjä.

3.1 Yleistä liikenteen aiheuttamista päästöistä

Liikenne on merkittävä päästöjen lähde erityisesti tiiviisti asutetuilla alueilla (Pant & Harrison 2013). Nämä päästöhiukkaset aiheuttavat merkittäviä terveyshaittoja ihmisille ja myös vaikuttavat huomattavasti ilmastoon. Liikenteen päästöihin vaikuttavat useat erilaiset parametrit, kuten olosuhteet ajon aikana, käytetyn polttoaineen ominaisuudet ja moottorissa käytetty teknologia. Liikenne aiheuttaa primäärisiä ja sekundäärisiä päästöjä, joiden lisäksi liikenne aiheuttaa epäsuorasti päästöjä esimerkiksi renkaiden ja teiden kulumisen takia.

Primääripäästöt ovat ajoneuvon suoraan aiheuttamat päästöt, jotka ovat usein lähtöisin autojen moottorista. Autojen moottorit ovatkin merkittävä pienhiukkasten lähde. Autojen päästöissä on paljon mustaa hiiltä, mutta myös metalleja ja ioneja (Pant & Harrison 2013). Maricq (2006) mukaan primäärihiukkaset syntyvät pääsääntöisesti kahdella eri tavalla: moottorin ulkopuolella pakokaasujen laimentumisen ja viilentymisen jälkeen tapahtuvassa nukleaatiossa tai moottorin sylinterissä tapahtuvassa epätäydellisessä palamisessa. Suurin osa päästöhiukkasista syntyy nukleaation vaikutuksesta ja suurin osa näistä päästöhiukkasista on alle 50 nm kokoisista (Kittelson 1998). Tuoreiden tutkimusten mukaan lukumäärän kannalta merkittävä osa liikenteen aiheuttamista hiukkaspäästöistä on kokoalueella 1.3-3.0 nm (Rönkkö *et al.* 2017).

Päästöt vaihtelevat hyvin paljon riippuen käytetystä polttoaineesta tai auton mallista. Chen *et al.* (2013) on raportoinut, että dieselin päästökerroin voi olla jopa neljä kertaa suurempi kuin bensiinin tunneliympäristössä mitattuna. Lisäksi raskaiden ajoneuvojen päästöt voivat olla kertaluokkaa suurempia verrattuna kevyisiin henkilöautoihin (Robert *et al.* 2007).

Liikenteen aiheuttamat sekundääripäästöt syntyvät, kun liikenteen emittoimat kaasut hapetuvat ilmakehässä ja siirtyvät hiukkasfaasiin. Nämä hiukkaset alkavat kasvamaan koagulaation ja kondensaation ansiosta (Kanakidou *et al.* 2005). Liikenteestä johtuvia päästöjä muodostuu myös autojen renkaiden ja jarrujen kulumisesta (Pant & Harrison 2013). Autojen renkaat kulumat niiden ja tienpinnan välisen voiman takia. Renkaat voivatkin menettää melkein 10% niiden painosta renkaan eliniän aikana. Renkaiden kulumiseen vaikuttavat monet tekijät kuten ajonopeus, ajo-olosuhteet, tienpinnan materiaali ja renkaassa käytetty materiaali (Pant & Harrison 2013).

Jarrujen kulumisesta aiheutuvat hiukkaset ovat peräisin jarrupalojen hankaamisesta toisiinsa vasten ja jarrupalojen materiaalien haihtumisesta. (Pant & Harrison 2013). Jarruista aiheutuvat päästöt ovat korkeimmillaan ruuhka-aikoina, jolloin autot pysähtyvät ja kiihdyttävät useita kertoja (Grieshop *et al.* 2006). Myös maanteiden rampeilla on havaittu suuria pitoisuuksia, jotka ovat peräisin autojen jarruista (Abu-Allaban *et al.* 2003). Näiden päästöjen hiukkasten lukumääräkokojakauman maksimi on noin 1-2 μm kohdalla ja hiukkasten massakokojakauman maksimi on noin 3-6 μm kohdalla. Päästöt koostuvat pääosin Fe-, Ba- ja Cu-hiukkasista, mutta myös muita metalleja on havaittu, kuten Zr, Zn ja Sb. On arvoitu, että yhden henkilöauton jarruista johtuvat päästöt ovat noin 44 g/auto/vuosi (Pant & Harrison 2013).

3.2 Katupöly

Katupöly koostuu pääosin karkeista hiukkasista, jotka ovat peräisin useasta eri lähteistä kuten liikenteestä, teollisuuden päästöistä ja erilaisista mineraaleista. Katupöly dominoi PM10 päästöjä talvella sekä aikaisin keväällä useissa Pohjoismaissa, joissa käytetään talvisin nastarenkaita ja tiet hiekoitetaan. Esimerkiksi Helsingissä (Pohjola *et al.* 2002) ja Tukholmassa on havaittu suuria PM10 pitoisuuksia talvella ja keväällä (Omstedt *et al.* 2005; Johansson *et al.* 2007).

Norman & Johansson (2006) on esittänyt, että paikalliset katupölypäästöt talvisin ovat peräisin kolmesta eri lähteestä:

- i Suorat päästöt kuivina ajanjaksoina, jotka johtuvat tien kulumisesta nastarenkaiden vaikutuksesta.
- ii Suorat päästöt kuivina ajanjaksoina, jotka johtuvat hiekoitushiekan tai kerääntyneen pölyn kulumisesta.
- iii Tienpintaan kerääntyneen katupölyn ja hiekoitushiekan suspensio tienpinnasta ajoneuvojen aiheuttaman ilmapirran vaikutuksesta. Pölyä kerääntyy tienpintaan kosteina ajanjaksoina, joka irtoaa kuivina aikoina tienpinnasta.

Suurin osa katupölystä on lähtöisin näistä kolmesta lähteestä. Suoria katupölypäästöjä syntyy lähteiden i-ii vaikutuksesta kun auton renkaat vuorovaikuttavat tienpinnan tai tienpinnalle kerääntyneen pölyn kanssa. Lisäksi ajoneuvot voivat aiheuttaa tienpintaan kerääntyneen katupölyn suspensiota tienpinnasta ajoneuvojen aiheuttaman ilmapirran vaikutuksesta (lähde iii).

Katupölyn määrään ilmassa vaikuttavat useat tekijät, kuten tienpinnan laatu ja ajoneuvon renkaat, nopeus sekä muoto (Hussein *et al.* 2008). Tienpinnan kosteus on suurin yksittäinen parametri, joka määrittelee kuinka paljon katupölyä irtoaa kadupinnasta. Suoria katupölypäästöjä on vähemmän tienpinnan ollessa kostea, sillä renkaat eivät tällöin kuluta tienpintaa yhtä paljon. Lisäksi tienpinnan ollessa kostea katupöly sitoutuu tiukemmin tienpintaan,

eikä suspensiota tapahdu yhtä paljon kuin kuivissa olosuhteissa. Usein katupölyä kerääntyykin kosteina ajanjaksoina tienpintaan. Tien kuivuessa katupöly alkaa pölyllymään ilmaan (Denby *et al.* 2013; Berger & Denby 2011). Myös tienpinnan laatu vaikuttaa katupölyn irtoamiseen, tasaiselta pinnalta hiukkaset irtoavat helpommin kuin epätasaiselta pinnalta (Hussein *et al.* 2008). Katupölyä irtoaa tienpinnasta vain, jos tarpeeksi iso virtauksen arvo saavutetaan (Sehmel 1973). Pääosin hiukkaset irtoavat autojen aiheuttamien virtauksien takia, tuulen irrottama katupöly on normaaleissa olosuhteissa merkityksetön (Mårtensson *et al.* 2006). Tuuli irrottaa katupölyä merkittävästi vain tuulen nopeuden ollessa yli 9 m/s (Vogt *et al.* 2011).

Usein katuja pesemällä yritetään vähentää katupölystä aiheutuvia päästöjä, mutta Espanjassa tehdyissä mittauksissa pesulla ei ollut vaikutusta $PM_{2.5}$ arvoihin (Karanasiou *et al.* 2012). Myös Tukholmassa tehdyissä mittauksissa pesulla havaittiin olevan vain marginaalinen vaikutus PM_{10} arvoihin (Norman & Johansson 2006).

Suomessa autoissa käytetyt nastarenkaat, teiden hiekoittaminen ja suolaaminen vaikuttavat merkittävästi ajoneuvojen irrottamaan hiukkasiin tien pinnasta (Kupiainen & Tervahattu 2004). Teiden hiekoittaminen lisää myös huomattavasti tien kulumista ja siitä irtoavia hiukkasia niin kutsutun hiekkapaperi-ilmiön takia. Hiekoitushiekka ei vain hajoa renkaiden alle pienemmiksi hiukkasiksi (jopa alle $< 10 \mu m$ hiukkasiksi), vaan ne myös kuluttuvat tienpintaa ja irrottavat hiukkasia siitä (Kupiainen & Tervahattu 2004; Kupiainen *et al.* 2015). Nastarenkaista ja teiden hiekoittamisesta ja suolaamisesta johtuva katupöly nostaa PM_{10} pitoisuuksia korkeammaksi talvisin ja keväisin (Kupiainen *et al.* 2015). Erityisesti nastarenkaat aiheuttavat huomattavasti enemmän päästöjä kuin kesärenkaat tai kitkarenkaat. Nastarenkaat voivat aiheuttaa 4.4 - 17.3 kertaisia päästöjä verrattuna kesärenkaisiin ja 2.0-6.4 kertaisia päästöjä verrattuna kitkarenkaisiin (Hussein *et al.* 2008). Nämä päästöt ovat karkeita hiukkasia hiukkaskoon geometrisen keskiarvon ollessa väliltä 3 - 5 μm (Hussein *et al.* 2008).

3.3 Liikenteen päästöt tunneliympäristössä

Tunnelit ovat suljettuja ja hallittuja ympäristöjä, joten ne tarjoavat hyvän mahdollisuuden tutkia liikenteen päästöjä reaalimaailman olosuhteissa (Sternbeck *et al.* 2002; Almeida-Silva *et al.* 2011). Vaikka tunneleissa on lähes aina ilmastointi, joka yrittää poistaa liikenteen aiheuttamia päästöjä tunnelista, on tunneleissa yleensä suurempi hiukkaspitoisuus kuin ympäröivässä ilmassa. Myös erilaisia kaasuja löytyy tunneli-ilmasta enemmän kuin normaali-ilmasta erityisesti ruuhkien aikana (El-Fadel & Hashisho 2001). Suurimmat hiukkas- ja kaasukonsentraatiot havaitaan juuri ennen tunnelin loppua, sillä liikenteen ja tunnelin ilmastoinnin aiheuttama ilmavirta kuljettavat kaasua ja hiukkasia kohti tunnelin loppua (Weijers *et al.* 2004). Tunnelin hiukkaspäästöt ovat peräisin liikenteen primääripäästöistä, autojen renkaiden ja jarrujen kulumisesta sekä autojen ja tienpinnan välisestä vuorovaikutuksesta (eli katupölystä). Tunnelissa liikenteen sekundaaripäästöt eivät ole kuitenkaan merkittäviä, sillä kaasujen hapettumista varten tarvitaan auringonvaloa, jota ei

tunnelissa ole tarjolla (El-Fadel & Hashisho 2001). Esimerkkejä kokojakaumista, joita tunnelista ollaan mitattu on kirjallisuudessa useita. Budapestissä tehdyissä tunnelimittauksissa Aitken-moodin kooksi saatiin 30 nm ja akkumulaatiomoodin kooksi noin 86 nm (Salma *et al.* 2011). Itävallassa ja Englannissa tehdyissä tunnelimittauksissa nukleaatiomoodiksi saatiin n. 20 nm ja akkumulaatiomoodiksi 70 - 100 nm (Imhof *et al.* 2006). Kaliforniassa tehdyissä tunnelimittauksissa havaittiin pääsääntöisesti vain yksi moodi 15-20 nm kohdalla, satunnaisesti havaittiin myös akkumulaatiomoodi välillä 60-100 nm. (Geller *et al.* 2005)

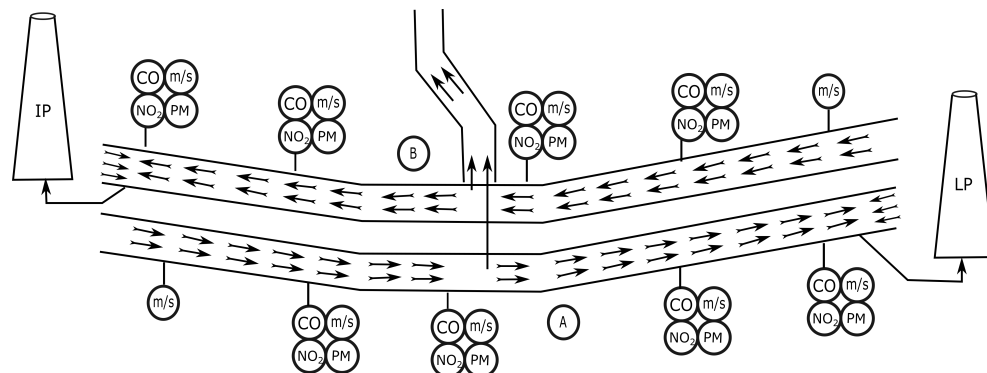
4. MITTAUKSET JA MENETELMÄT

Tässä kappaleessa esitellään Tampereen Rantatunneli, jossa mittaukset suoritettiin. Myös mittauksissa käytetty laitteisto sekä niiden toimintaperiaatteet esitellään. Lopuksi pureudutaan mittausten aikana vallinneisiin sääolosuhteisiin ja liikennemääriin sekä tulostenkäsittelyyn.

4.1 Tampereen Rantatunneli

Mittaukset suoritettiin Tampereen Rantatunnelissa, joka on vuonna 2016 valmistunut 2.3 km pitkä maantietunneli Tampereen Näsijärven rannassa. Tämä on Suomen pisin maantietunneli. Tunneli koostuu kahdesta erillisestä tunneliputkesta, A ja B- tunneliputkesta. B-tunnelissa liikenteen suunta on idästä länteen (Tampereen keskustasta kohti Ylöjärveä) ja A-tunnelissa liikenteen suunta on lännestä itään (Ylöjärveltä kohti Tampereen keskustaan). Molemmissa tunneleissa on 60 km/h nopeusrajoitus.

Tunnelin ilmanvaihto koostuu tunnelin katossa olevista siirtoilmapuhaltimista, jotka puhaltavat ilmaa liikenteen suuntaan, poistopiippujen puhaltimista, jotka ohjaavat ilmaa tunnelien poistopiippuihin, sekä vastailmapuhaltimista tunnelin suulla, jotka puhaltavat liikennettä vastaan ilmaa. Kuvassa 4 on havainnollistettu tunnelin ilmanvaihtoa.



Kuva 4. Kaaviokuva Tampereen Rantatunnelista. Tunnelin sisällä olevat nuolet kuvaavat katossa olevia siirtoilmapuhaltimia. A- ja B-tunnelin ulostuloaukon kohdalla on kaksi poistoilmapuhallinta, jotka imevät ilmaa poistopiippuihin. Lisäksi molemmissa tunneleissa on keskellä yksi poistoilmapuhallin, joka imee ilmaa tunnelin keskeltä. Kuvassa on myös esitetty tunnelissa olevat mittauspisteet, joita on yhteensä viisi kappaletta kummassakin tunnelissa. Yhdessä mittauspisteessä mitataan ainoastaan ilman nopeutta (kuvassa m/s).

Kaikissa muissa mittauspisteissä mitataan ilman nopeuden lisäksi CO- pitoisuutta (kuvassa CO), NO₂ pitoisuutta (kuvassa NO₂) sekä näkyvyyttä (kuvassa PM).

Siirtoilmapuhaltimet ovat sijoitettuna molempien tunnelien kattoon (kuvassa 4 tunnelissa olevat nuolet). Siirtoilmapuhaltimet ovat asennettuna pareittain ja parit ovat 150

metrin päässä toisistaan. Yhteensä näitä pareja on yhdessä tunnelissa 15 kappaletta. Nämä puhaltimet käynnistyvät automaattisesti, jos tunnelin CO - tai NO_2 -pitoisuus nousee liian korkeaksi. Tunnelin sisällä vallitseva ekstinktio ei vaikuta puhaltimien toimintaan, mutta tuulettimien tehoja voidaan säätää manuaalisesti tunnelin ohjauskeskuksesta. Osa siirtoilmapuhaltimista laitetaan usein päälle, jos tunnelissa on liian huono näkyvyys.

Poistopiippujen puhaltimet ohjaavat tunnelin ilmaa poistopiippuihin poistokammion kautta. Molemmilla tunnelilla on oma poistopiippunsa ja molemmissa tunnelissa on kolme poistoilmapuhallinta, jotka ohjaavat ilmaa poistoilmakanavien kautta poistopiippuihin. Kaksi poistoilmapuhaltimista imee tunnelin ilmaa tunnelin ulostuloaukon kohdalta. Yksi poistoilmapuhallin imee ilmaa tunnelin keskiosasta (kuva 4). Poistoilmapuhaltimen tarkoituksena on ohjata tunnelin päästöt mahdollisimman hyvin poistopiippuihin. Normaalisti näitä poistoilmapuhaltimia ohjataan aikaohjelman ja ilman nopeuden mukaisesti. Tyypillisesti poistoilmapuhaltimet ovat pois päältä öisin, kuitenkin näiden mittausten aikana nämä puhaltimet säädettiin siten, että ne olivat päällä kellon ympäri. Poistoilmapuhaltimen teho riippuu tunnelin ilman nopeudesta. Mitä suurempi tunnelissa oleva virtaus on, sitä suuremmalla teholla poistoilmapuhaltimet toimivat.

Tunnelin suuaukoissa olevat vastailmapuhaltimet käynnistyvät, kun poistoilmapuhaltimet käyvät 25 % teholla. Näitä puhaltimia ohjataan myös tunnelin ilmapirtauksen mukaan, ilmapirtauksen kasvaessa vastailmapuhaltimien tehoja kasvatetaan. Näiden vastailmapuhaltimien tarkoitus on tehostaa poistoilmapuhaltimien toimintaa, kun tunnelissa vallitsee suuri ilmapirtaus.

Tunnelia myös pestiin säännöllisesti mittausten aikana. Pesun tarkoituksena on poistaa ylimääräistä katupölyä tienpinnasta ja siten parantaa tunnelissa vallitsevaa näkyvyyttä. Tunneli pystyttiin pesemään vain lämpötilan ollessa yli $0^{\circ}C$. A- ja B- tunneli pestiin yhteensä neljä kertaa aikavälillä 01.01.-01.04.2018.

4.2 Mittauksissa käytetty laitteisto

Mittauskampanjan aikana käytettiin useita erilaisia mittauslaitteita, jotta tunnelin ilmanlaadusta saataisiin mahdollisimman kattava kuva. Mittauksissa käytettiin laitteistoa mittaamaan niin hiukkasten lukumääräkokojakaumaa kuin hiukkasten konsentraatiota. Myös eri kaasujen konsentraatioita mitattiin. Rantatunnelissa on myös lisäksi kiinteitä mittalaitteita, joiden dataa käytettiin hyväksi mittausten aikana. Tässä kappaleessa esitellään nämä mittalaitteet ja niiden toimintaperiaatteet. Lisäksi kappaleessa esitellään mittauksissa käytetty mobiililaboratorio.

4.2.1 Hiukkasten jakaumaa ja kokonäismäärää mittaava laitteisto

ELPI (engl. *Electrical Low Pressure Impactor*, Dekati Ltd.) on sähköinen alipaineimpaktori, joka mittaa hiukkaskokojakaumaa reaaliaikaisesti aerodynaamisen koon funktiona. ELPI:n

toiminta perustuu koronavarajaan, joka varaa hiukkaset unipolaarisesti. Nämä varatut hiukkaset ohjataan impaktoriin, jossa on peräkkäin useita impaktoriasteita. Osa hiukkasista ei inertian takia pysty seuraamaan virtausta vaan osuvat impaktiolevyyn. Laite mittaa näille impaktoriasteille luovutetun varauksen, josta voidaan laskea aerosolihiukkasten kokojakauma (Keskinen *et al.* 1992). Näissä mittauksissa käytettiin kahta malliltaan samanlaista ELPI:iä. Molemmissa ELPI:eissä oli 12 impaktoriastetta ja ne mittasivat hiukkasia kokoalueelta 30nm - 10 μ m. Toinen ELPI oli sijoitettuna koko mittauksien ajan tunneliin (ns. pitkäaikaismittaukset) ja toista käytettiin mobiililaboratoriomittauksissa. Molempien näytevirtaus oli 10 lpm.

CPC (engl. *Condensation Particle Counter*) on mittalaite, joka mittaa hiukkasten lukumäärää optisesti laserin avulla. Kaikista pienimpiä hiukkasia ei pystytä havaitsemaan optisesti, joten ne joudutaan kasvattamaan riittävän isoiksi jotta ne pystytään havaitsemaan. Hiukkasia pystytään kasvattamaan tiivistämällä hiukkasten pinnoille vesi- tai alkoholihöyryä. Jotta tiivistymistä tapahtuisi, täytyy saavuttaa ylikyllästystila. Usein tämä ylikyllästystila saavutetaan lämpötilaerojen, aerosolin adiabaattisen laajenemisen tai kylmän ja kuumen virtauksen sekoittamisen avulla. CPC pystyy mittaamaan jopa kooltaan noin 3 nm (Cheng 2005) kokoisia hiukkasia. Tässä tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista CPC:tä, mutta molemmissa ylikyllästystila saavutettiin lämpötilaerojen avulla ja hiukkasten kasvattamiseen käytettiin butanolia. Toinen CPC (model 3775, TSI Inc) mittasi itsenäisesti, toinen CPC (A20, Airmodus) oli sijoitettuna PSM perään.

Hiukkaskoonkasvattajaa eli PSM:ää (engl. *Particle Size Magnifier*) käytetään kasvattamaan liikkuvuushalkaisijaltaan 1 nm:n kokoiset aerosolihiukkaset noin 90 nm:n kokoisiksi. Näin pystytään havaitsemaan jopa alle 3 nm:n aerosolihiukkaset, kun kasvatetut hiukkaset johdetaan PSM:n jälkeen CPC:hen. PSM:ssä hiukkaset kasvatetaan dietyleeniglygolin (DEG) kondensaatiolla hiukkasen pinnalle.

4.2.2 Kaasuja mittaava laitteisto

Mobiililaboratoriomittauksissa oli hiukkasia mittaavan laitteiston lisäksi kaasuja mittaavaa laitteistoa. CO- ja CO₂-pitoisuuksien mittaamiseen käytettiin CO12M -analysaattoria (Environment, S.A.). Mittalaitteen toiminta perustuu siihen, että mittalaite laskee kuinka paljon näytekaasu absorboi infrapunavaloa. Tästä pystytään määrittämään näytekaasun CO-pitoisuus käyttämällä avuksi referenssisignaalia. Aina ennen mittauksia mittalaite nollattiin tyhjiällä. Laite otti 1 lpm näytevirtauksen ja mittaus oli reaaliaikaista

CO₂ pitoisuuksien mittaamiseen käytettiin LI-8404 (LICOR) analysaattoria. Myös tämän mittalaitteen toiminta perustuu siihen, kuinka paljon näytekaasu absorboi infrapunavaloa. Tästä tiedosta voidaan laskea referenssisignaalin avulla CO₂-pitoisuus.

Typen oksidien pitoisuuksien mittaamiseen käytettiin NO_x analysaattoria (model T200, TAPI). Laitteen toiminta perustuu kemiluminesenssiin ja se mittasi reaaliaikaisesti.

4.2.3 Etalometri

Etalometri (Magee Scientific) on laite, joka mittaa reaaliaikaisesti optisesti absorboivan mustan hiilen konsentraation. Näitä hiukkasia vapautuu kaikenlaisesta palamisesta ja erityisesti liikenteen päästöinä (Hansen 2005). Etalometri imee noin 3 litraa näytevirtausta ja kerää tämän näytevirtauksen suodattimelle. Mittalaite tekee jatkuvaa optista analyysia suodattimella olevalle näytteelle näytteen kerääntyessä. Suodatin liikkuu ainoastaan, kun tietty tiheys suodatinnauhalla on saavutettu. Tässä tutkimuksessa käytetyssä laitteessa automaattikka suodatinnauhan liikuttamiseen ei toiminut, vaan nauhaa täytyi liikuttaa manuaalisesti tietyin väliajoin.

Etalomerin toiminta perustuu Beer-Lambertin lakiin, joka kuvaa kuinka paljon valon intensiteetti muuttuu väliaineessa (Hansen 2005):

$$I = I_0 e^{k_{abs}x}, \quad (4.2.1)$$

jossa I_0 on tulevan valon intensiteetti ja I on valon intensiteetti kun se on läpäissyt väliaineen, jonka paksuus on x . Vaimeneminen ATN (engl. attenuation) annetaan tyypillisesti prosenttiarvoina ja se on määritelty

$$ATN = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right). \quad (4.2.2)$$

Etalometri mittaa valon vaimenemista suodattimen läpi, johon kaikki valoa absorboivat hiukkaset oletetaan tarttuvan. Kaksi detektoria mittaa suodattimen läpäisemää valoa; yksi detektori mittaa suodatinfiltterin läpäisemää valoa näytteen kohdalta ja toinen detektori mittaa suodatinfiltterin läpäisemää valoa puhtaalta suodatinfiltteriltä. Näiden tietojen avulla pystytään laskemaan suodattuneiden hiukkasten absorptiovakio k_{ATN}

$$k_{ATN} = \frac{A}{Q} \frac{\Delta ATN}{\Delta t}, \quad (4.2.3)$$

jossa A on filterin pinta-ala, Q on näytteen tilavuusvirtaus ja ΔATN on valon vaimenemisen muutos aikavälillä Δt . Kuitenkin tämä k_{ATN} voi poiketa oikeasta ilman aerosolin absorptiovakiosta k_{abs} (Weingartner *et al.* 2003). Tätä virhettä voidaan korjata kalibraatiovakioiden avulla

$$k_{abs} = k_{ATN} \frac{1}{C * R(ATN)}, \quad (4.2.4)$$

jossa C ja $R(ATN)$ ovat kalibraatiovakioita. C arvo riippuu hyvin paljon käytetystä laitteistosta ja suodatinfiltteristä. Kalibraatiovakio $R(ATN)$ saadaan kaavalla:

$$R = 0.4 + 0.6 \exp(-ATN/100\%) \quad (4.2.5)$$

Kun tiedetään aerosolin absorbtiovakio, voidaan laskea mustan hiilen konsentraatio

$$[BC] = \frac{k_{abs}}{\sigma_{abs}}, \quad (4.2.6)$$

jossa σ_{abs} on absorptiopinta-ala massalle (yksiköissä $m^2 g^{-1}$). Tämän vakion arvo riippuu paljon käytetystä etalometristä. Tässä mittauksissa käytetyn etalometrissa σ_{abs} arvo oli $16.6 m^2 g^{-1}$ (Hansen 2005)

Tässä tutkimuksessa käytetyn etalometri käytti vain yhtä valon aallonpituutta, joka oli 880 nm. On olemassa myös etalometrejä, jotka käyttävät yhtä tai useampaa aallonpituutta. Etalometri mittasi dataa viiden sekunnin välein.

4.2.4 Tampereen Rantatunnelin ilmanlaadun tarkkailu

Tampereen Rantatunnelissa on asennettuna kiinteästi mittalaitteita, jotka tarkkailevat tunnelin ilmaa. Mittalaitteena toimii sensori (VICOTEC302, SICK), joka mittaa ekstinktiota, NO_2 :sta ja hiilimonoksidia. Näitä sensoreita on asennettuna molempiin tunneliin neljään eri kohtaan, 650 m, 1150 m, 1650m ja 2100 metrin kohdalle putkien sisääntuloaukosta (kuva 4).

Sensori koostuu kahdesta osasta, varsinaisesta sensorista ja heijastajasta. Nämä ovat asetettu 20 metrin päähän toisistaan. Sensori lähettää näkyvää- ja UV-valoa, jotka heijastaja heijastaa takaisin ja sensori vastaanottaa. NO_2 :n mittaus perustuu DOAS:iin (engl. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*). DOAS on tapa mitata kaasuja mittaamalla niiden aiheuttama absorptio näkyvän valon ja UV-valon spektristä (Platt 1994). CO:n mittaus perustuu sähköpariin ja ekstinktiomittaus transmission mittaamiseen. Taulukossa 1 on esitetty VICOTEC302-sensorin mittausalueet ja -virheet.

Taulukko 1. VICOTEC302-sensorin mitaamat suureet ja niiden virherajat

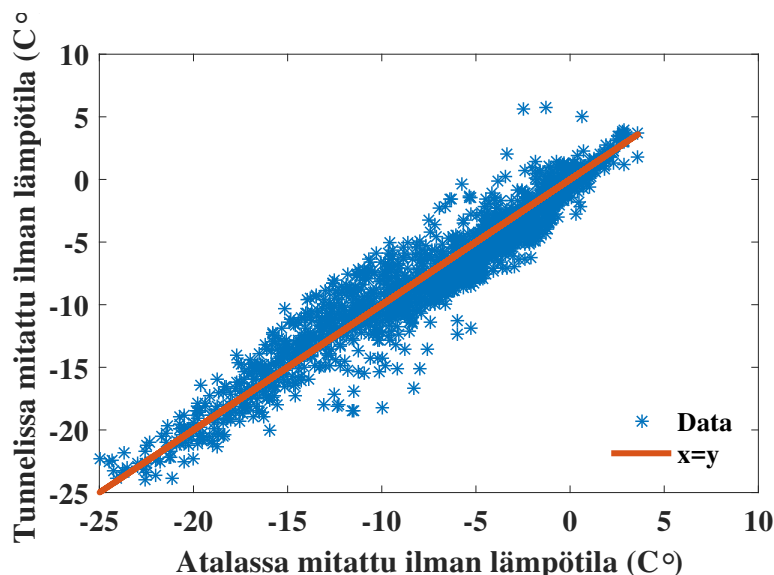
Mitattava suure	Mittaalue	Virheraja
Ekstinktio	0-15 1/km	$\pm 0.8 \cdot 10^{-3}$ 1/km
NO_2	0-5 ppm	± 0.05 ppm
CO	0-300 ppm	± 10 ppm

Molemmissa tunnelissa mitataan myös tunnelissa vallitsevan virtauksen nopeutta viidestä eri kohtaa (kuva 4). Ilmavirran nopeus mitataan FLOWSIC200-sensorilla, joka perustuu ultraäänen nopeuden mittaamiseen. Kaksi FLOWSIC200-sensoria on asetettu kummallekin puolelle tunnelia. Toinen sensoreista lähettää ultraääniaallon ja toinen heijastaa sen takaisin. Tästä lasketaan matkaan kulunut aika, josta voidaan laskea ilmavirran nopeus.

Näiden sensoreiden lisäksi B-tunnelissa on yksi tiesääasemassa, jossa mitataan tien lämpötilaa, ilman lämpötilaa ja ilman kastepistettä. Tämä mittaus tapahtuu vain yhdessä kohtaa B-tunnelin alussa. A-putkessa ei ole vastaavaa mittausta. Tämä tiesääasema on asennettu vasta vuoden 2018 alussa, joten sitä aikaisemmin dataa ei ole saatavilla.

Pidemmältä aikaväliltä dataa on saatavilla Atalan tiesääasemalta, joka on noin 5 km päästä Rantatunnelista. Atalan tiesääasemalta mitattu tien lämpötila vastaa huonosti Rantatunnelin tienlämpötilaa, sillä ulkoilmassa säteilytasapaino (aurinko ja pilvet) vaikuttavat tien

lämpötilaan. Kuitenkin ilman lämpötila on hyvin vertailtavissa tunnelin lämpötilaan. Kuvassa 5 on esitettyä tunnelista mitattu lämpötila Atalassa mitatun lämpötilan funktiona aikaväliltä. Molemmat lämpötilat vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Atalassa mitattua ilman lämpötilaa voidaanakin käyttää arvioimaan tunnelissa vallitsevaa ilman lämpötilaa.



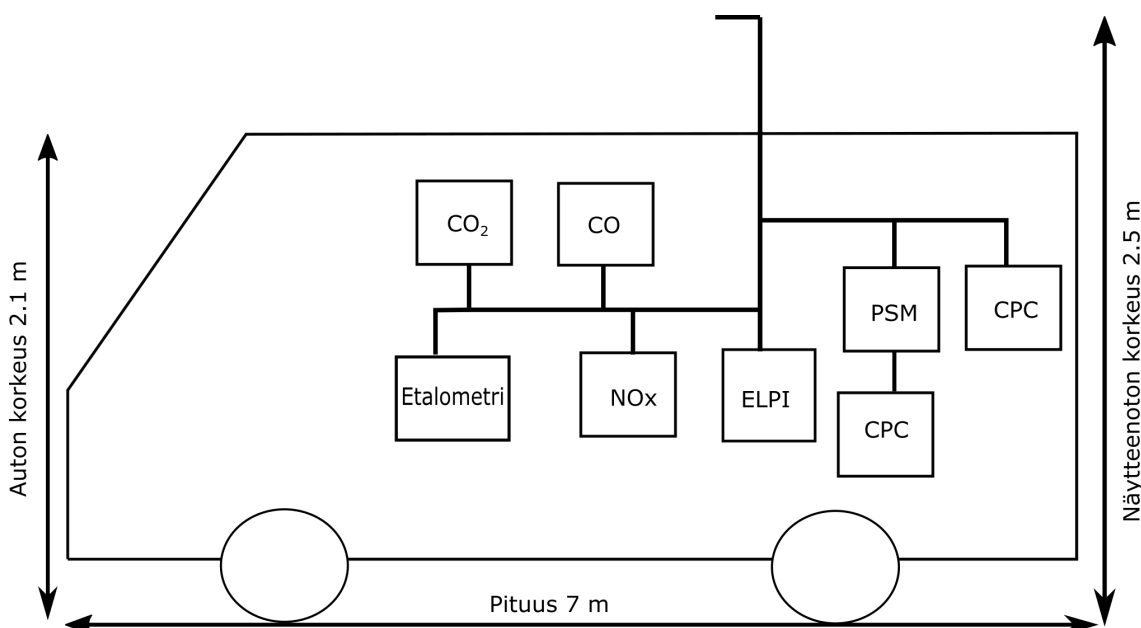
Kuva 5. Tunnelissa mitattu lämpötila Atalassa mitatun lämpötilan funktiona aikavälillä 01.01.-30.03.2018

4.2.5 Mobiililaboratorio

TTY:n Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratorio on Mercedes-Benz Sprinter A3 319 -mallinen pakettiauto. Autossa ei ole kiinteitä mittalaitteistoa katolla olevan sääaseman lisäksi, vaan jokaista mittauskamppanjaa varten mittalaitteet asennetaan auton takatilaa riippuen mittauksen tarpeesta. Mobiililaboratoriota onkin käytetty useissa erilaisissa mittauksissa, esimerkiksi liikenteen päästöjen mittaamiseen Euroopassa (Rönkkö *et al.* 2017). Kuvassa 6 on esitettyä kaaviokuva mobiililaboratoriosta ja mittausjärjestelyistä mobiililaboratorion sisällä.

Auto jakautuu väliseinän jakamana kahteen erilliseen tilaan. Takaosa on tarkoitettu mittalaitteiden kuljettamiseen tai taitettavien hyllyjen ansiosta laitteilla mittaamiseen. Hyllyissä on kiinnityskiskot laitteille, joiden avulla mittalaitteet saadaan kiinnitettyä tukevasti paikalleen. Ilmastointilaitteen avulla pystytään säätämään takaosassa vallitsevaa ilman lämpötilaa. Tämä on hyödyllistä erittäin kylmän tai kuumien sään aikana, kun mittalaitteet täytyy pitää niille sopivassa lämpötilassa. Etuosassa on käännettävät kuskin ja apukuskin istuimet. Näiden takana on istuin mittaajalle ja pöytä kannettaville tietokoneille, joihin mittalaitteet oli yhdistetty.

Näytteen mobiililaboratorioon pystyy saamaan viiden valmiin näytteenlinjan kautta, jotka ovat tehty happoteräspuutkesta. Lisäksi autossa on olemassa viisi valmista teflon-linjaa



Kuva 6. TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratorio ja tässä tutkimuksessa käytetty mittalaitteisto. Kuvassa esitettyjen dimensioiden lisäksi mobiililaboratorio on 2 metriä leveä.

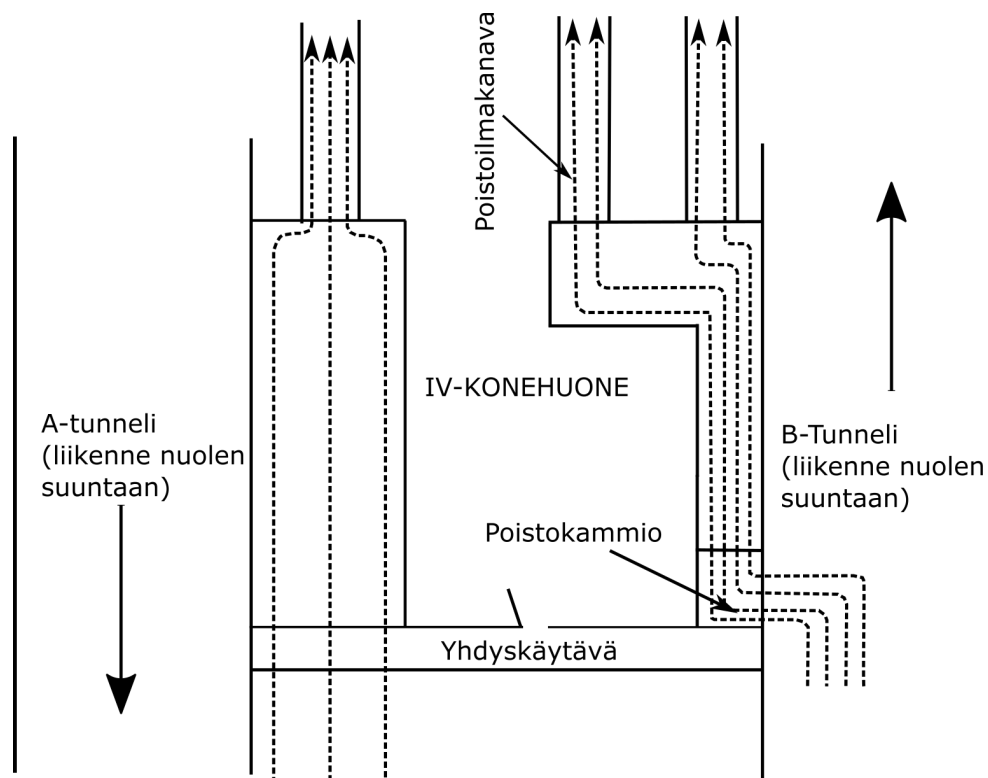
kaasuille. Näytelinjojen lisäksi mobiililaboratoriossa on viisi erillistä läpivientiluukkuu, joiden läpi pystytään viemään näytteenottoputket eli inletit. Tässä tutkimuksessa käytettiin auton katossa olevaa läpivientiluukkuu, jonka läpi vietiin happoteräsputkesta tehty inletti. Näin pyrittiin minimoimaan näytteenotossa tapahtuvia häviöitä. Inletti oli 42 cm korkeammalla kuin auton katto (eli 2.52 m maasta), putken halkaisija oli 8 mm ja sisäänottoaukon halkaisija oli 6 mm.

Mittalaitteet sijoitettiin takatilaan siten, että kaikki hiukkasia mittaavat laitteet olisivat mahdollisimman lähellä inlettiä hiukcashäviöiden minimoimiseksi. Koska kaasuilla ei häviöitä tapahdu läheskään yhtä paljon kuin hiukkasilla, oli kaasuja mittaava laitteisto sijoitettuna kauimmaksi. Kuitenkin takatilan ahtauden takia jouduttiin tekemään kompromisseja. Laitteet sidottiin paikoilleen kuormaliinoilla, jotta laitteet eivät liikkuisi mittausten aikana. CPC:n ja PSM:n eteen asennettiin siltalaimennin (laimennussuhde 6.9), sillä CPC pystyy mittaamaan vain tarpeeksi pieniä konsentraatioita.

Mobiililaboratoriossa on myös 4.7 kWh litium-akku, jonka avulla mittauksia voidaan suorittaa myös auton ollessa paikallaan. Ajaessa akku latautuu hitaasti (riippuen kuormasta, joka on akkuun kiinnitetty), mutta kaupunkiajossa akku ei juurikaan lataudu. Ongelmaksi muodostui tässä tutkimuksessa se, että ajon aikana akun ollessa täyteen ladattu, saattoi se mennä pois yhtäkkiä pois päältä, jonka takia kaikki mittauslaitteet sammuiivat. Tätä pyrittiin välttämään pysähtyen aina kuluttamaan akkua, kun akun lataus alkoi olla täynnä.

4.3 Pitkäaikaismittaukset Tampereen Rantatunnelissa

Pitkäaikaismittausten tarkoituksena oli saada jatkuvaa tietoa tunnelissa ja erityisesti sen poistoilmassa vallitsevasta hiukkaskokojakaumasta ja -konsentraatiosta. Mittalaitteena käytettiin ELPI:ä, joka oli sijoitettuna B-tunnelin IV-konehuoneeseen tammi-maaliskuun välisen ajan (8.1.-8.3.). Mittausten alun (8.1.-14.2.) tunneli oli sijoitettuna poistoilmakanavaan, joka ohjaa ilmaa kohti poistopiippuja (kuvan 7 keskimäinen poistoilmakanava).



Kuva 7. Kaaviokuva Tampereen Rantatunnelin B-putken IV-konehuoneesta. Katkoviivat kuvassa kuvastavat ilmavirtauksen kulkua ilmanvaihtokanavissa.

Poistoilmakanavat olivat läpimitaltaan 2.6 metriä ja niissä vallitseva virtaus vaihteli poistoilmapuhaltimien tehosta riippuen. Tavanomaisissa päiväolosuhteissa virtaus oli n. 10 lpm. Näyte otettiin mittauslaitteelle poistoilmakanavasta 1.5 metriä pitkällä inletillä, jolle porattiin reikä poistoilmakanavaan. Inletti pyrittiin asettamaan keskelle poistoilmakanavaan ja sen suuaukko suunnattiin kohti virtausta. Inletin suuaukon leveys oli 10 mm ja putken leveys 12 mm.

Mittausten puolivälissä ELPI siirrettiin poistokammioon (14.2.-8.3.). Poistokammio oli poistoilmapuhaltimien ja tunnelin välissä oleva huone, jonka kautta poistoilmapuhaltimien imevä ilmavirtaus kulkee. Poistokammiossa ELPI:llä ei ollut mitään erityistä inlettiä, vaan mittalaite otti näytteen suoraan huoneen ilmasta. Tällöin merkittäviä häviöitä ei mitauksessa pitäisi tapahtua.

ELPI:ä käytiin huoltamassa mitausten aikana viikoittain, kerran tai kaksi kertaa viikossa riippuen aikatauluista ja sääolosuhteista. Huollon aikana mitattu data kerättiin, tehtiin

nollamittaus (ennen ja jälkeen impaktorin alustojen vaihtamisen), ELPI:n impaktorin alustat vaihdettiin uusiin sekä varmistettiin, että laite toimii ja tuottaa järkeviä mittaustuloksia.

Pitkäaikamittausten aikana suoritettiin kahden viikon aikana pitkäaikaisia puhallintestejä. Näiden testien tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia pitkäaikaisia vaikutuksia siirtoilmapuhaltimien tehoilla oli tunneli-ilmaan. Kummallakin testiviikolla A- ja B-tunnelien siirtoilmapuhaltimia pidettiin aina kaksi päivää vakioteholla. Näiden kahden päivän jälkeen siirtoilmapuhaltimien tehoa kasvatettiin ja teho pidettiin vakiona taas kaksi päivää. Molemmilla testiviikoina tehtiin identtiset testit. Taulukossa 2 on esitettynä näiden testien ajankohdat ja vaiheet.

Taulukko 2. Pitkäaikaisten puhallintestien ajankohdat ja vaiheet

Päivämäärä	Siirtoilmapuhaltimien tehot
26.-28.2.	Tunnelin alussa joka toinen 50% teholla, lopussa kaikki 50% teholla
28.-2.3.	Tunnelin alussa kaikki 50% teholla, lopussa kaikki 70% teholla
5.-7.3.	Tunnelin alussa joka toinen 50% teholla, lopussa kaikki 50% teholla
7.-9.3.	Tunnelin alussa kaikki 50% teholla, lopussa kaikki 70% teholla

Molempien viikkojen alussa tuulettimet olivat pienemmällä teholla ja loppuviikosta tuulettimet laitettiin isommalle teholle. Ensimmäinen testi kummallakin viikolla oli maanantaista keskiviikkoon ja jälkimmäinen keskiviikosta perjantaihin.

4.4 Mobiililaboratoriomittaukset Tampereen Rantatunnelissa

Pitkäaikaismittausten lisäksi suoritettiin mobiililaboratoriomittauksia. Näiden mittausten aikana TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratoriolla ajettiin tunnelin läpi useita kertoja samalla mitaten tunnelin ilmaa usealla eri mittalaitteella. Mobiililaboratoriomittauksissa käytetty mittauslaitteisto on koottuna taulukkoon 3 ja mittalaitteiden asettelu autoon on kuvattuna kuvassa 6.

Taulukko 3. Mittalaitteet mobiililaboratorion aikana. Etalometri oli mittaamassa vain kahden jälkimmäisen mobiililaboratoriomittauksen aikana. Mittalaitteiden tarkempi esittely löytyy kappaleesta 4.2

Mittalaite	Kuvaus
ELPI, Dekati Ltd	Hiukkasten kokojakauma väliltä 30 nm - 10 um
CPC, TSI Inc.	Hiukkasten lukumäärä yli 3 nm hiukkasille
PSM + CPC, Airmodus	Hiukkasten lukumäärä yli 1.3 nm hiukkasille
Etalometri, Magnee Scientific	Mittaa optisesti absorboivien hiukkasten konsentraation
NO _x , T200, TAPI	Mittaa NO + NO ₂ konsentraatiota (ppb)
CO, Environment S.A.	Mittaa CO konsentraatiota (ppm)
CO ₂ , Licor	Mittaa CO ₂ konsentraatiota (ppb)
Mobiililaboratorion sääasema	Lämpötila, kosteus, auton nopeus ja koordinaatit

Mobiililaboratoriomittausten tarkoituksena oli saada tarkempi kuva tunnelin ilmanlaadusta ja näkyvyydestä huonojen näkyvyysjaksojen aikana. Mobiililaboratoriomittaukset

pyrittiinkin tekemään mahdollisimman kuivana ja kylmänä ajanjaksona, sillä havaintojen mukaan tunnelin näkyvyys on huonoimillaan juuri noissa olosuhteissa. Mobiililaboratoriomittaukset suunniteltiin tehtäväksi tammi-helmikuussa. Tänä aikana sääennusteita seurattiin tarkasti, jotta mittaukset saataisiin tehtyä mahdollisimman optimaaliseen aikaan. Lopulta mittauksia päästiin tekemään neljä kappaletta. Kaksi näistä mittauksista suoritettiin päivällä aikavälillä 14.00 - 19.00 ja kaksi yöllä aikavälillä 22.00-03.00. Mittauksia suoritettiin myös yöaikaan, koska tällöin liikennemäärä tunnelissa on huomattavasti pienempää kuin päivisin. Näin liikenteen vaikutus mittauksiloksiin oletettiin olevan vähäisempi.

Mittauksien aikana tunnelissa ajettiin mahdollisimman tasaisesti 60 km/h nopeudella. Edellä oleviin autohin pyrittiin pitämään tarpeeksi isoa etäisyyttä, jotta edellä ajavan auton pakokaasupäästöt eivät vaikuttaisi mittauksiloksiin. Mittauspöytäkirjaan kirjattiin tapaukset, jolloin edellä oleva auto ajoi poikkeuksellisen lähellä mobiililaboratoriota tai aiheutti erityisen paljon paikallisia päästöjä tunneliin. Taulukkoon 4 on kerättyä mobiililaboratoriomittausten päivämäärät, läpiajojen määrät ja sääolosuhteet mittausten aikana.

Taulukko 4. *Mobiililaboratoriomittausten ajankohta, tunneleissa tehtyjen läpiajojen määrä ja näiden mittausajojen aikana vallinnut lämpötila sekä kosteus. Kosteus ja lämpötila on mitattu B-tunnelin sisältä.*

Päivämäärä	Kellonaika	Läpiajojen määrä	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)
16.-17.1.	22.00-03.00	64	-6.5 ± 0.6	74 ± 4.2
17.1.	14.00-19.00	68	-7.3 ± 0.4	77 ± 1.9
20.-21.2.	22.00-03.00	66	-19 ± 1.4	93 ± 3.1
21.2.	14.00-19.00	70	-15 ± 1.6	94 ± 3.2

Taulukossa läpiajojen määrä tarkoittaa A- ja B-tunnelien yhteenlaskettua läpiajojen määrää. Tunnelista ajettiin läpi siis yhteensä 268 kertaa näiden mobiililaboratoriomittausten aikana. Lämpötilat ja kosteudet on mitattu B-tunnelin sisältä tiesääasemalta ja ovat keskiarvoja mittausten aikaväliltä. Molemmat mittaukset saatiin tehtyä kylmässä säässä, vaikka jälkimmäisen mittauksen aikana oli huomattavasti kylmempää. Tällöin oli myös suurempi ilmankosteus verrattuna ensimmäisiin mittauksiin. Peräkkäisten yö- ja päivämittausten välillä ei ole suurta eroa lämpötiloissa tai kosteudesta.

Mobiililaboratoriomittausten aikana suoritettiin lisäksi testejä siirtoilmapuhaltimilla. Siirtoilmapuhaltimien tehoa vaihdeltiin ennalta määrättyinä aikoina. Näiden tehovaihtelutestien pyrkimyksenä oli selvittää, kuinka paljon puhaltimien teho vaikuttaa hiukkasten lukumääräkonsentraatioihin ja -jakaumiin tunnelissa. Puhallintesteissä oli neljä eri vaihetta, jotka on kuvattu taulukossa 5.

Ensimmäisessä vaiheessa kaikki puhaltimet olivat pois päältä ja tämä vaihe kesti tunnin. Tämän jälkeen siirtoilmapuhaltimet tunnelin puolestavälistä loppuun laitettiin teholle 50% puolentoistatunnin ajaksi. Seuraavassa vaiheessa tehoa nostettiin vielä, tunnelin alkupuolen siirtoilmapuhaltimet laitettiin 50% teholle ja tunnelin lopun siirtoilmapuhaltimet 80 %

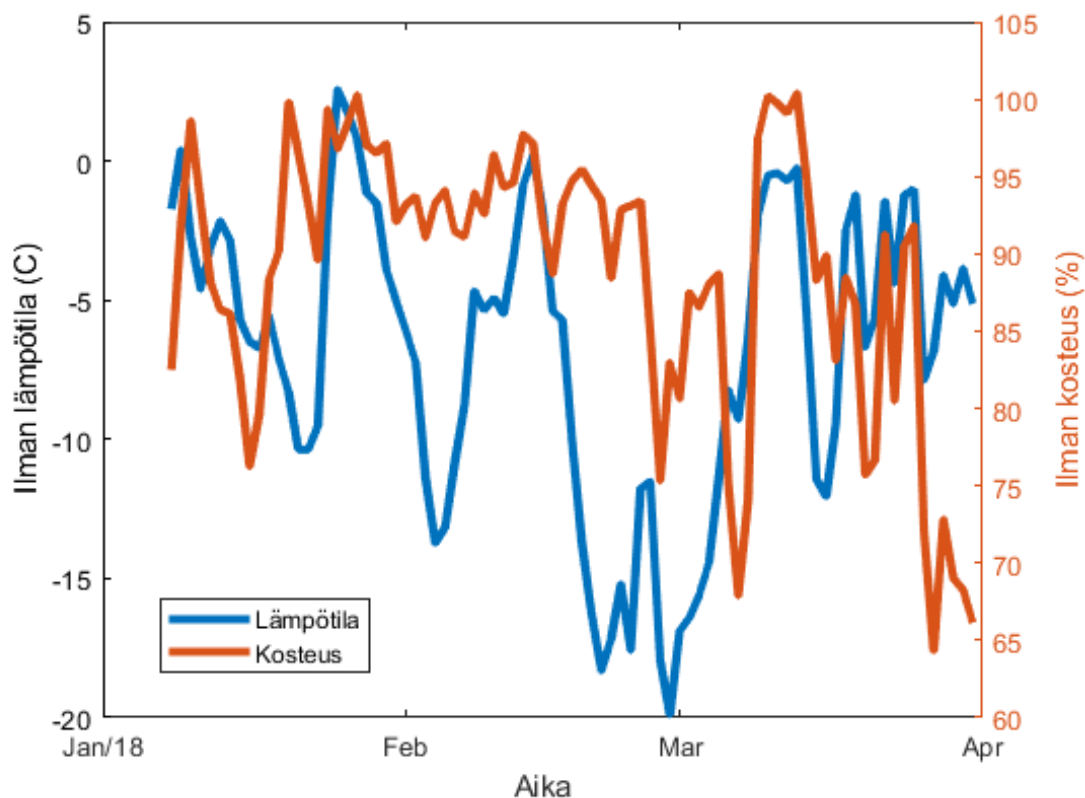
Taulukko 5. Testi siirtoilmapuhaltimilla mobiililaboratoriomittausten aikana

Kellonaika (yö, päivä)	Siirtoilmapuhaltimien tehot
22.00-23.00, 14.00-15.00	Puhaltimet pois päältä
23.00-00.30, 15.00-16.30	Alusta puoliväliin pois päältä, puolivälistä loppuun 50%
00.30-02.00, 16.30-18.00	Alusta puoliväliin 50% , puolivälistä loppuun 80%
02.00-03.00, 18.00-19.00	Puhaltimet pois päältä

teholle puolentoistatunnin ajaksi. Neljäntenä ja viimeisenä vaiheena kaikki siirtoilmapuhaltimet otettiin pois päältä tunnin ajaksi.

4.5 Sääolosuhteet ja liikennemäärä tunnelissa mittausten aikana

Kuvassa 8 on esitettyä B-tunnelin tiesääaseman mittaama ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vuorokausikeskiarvot koko mittausten ajan.

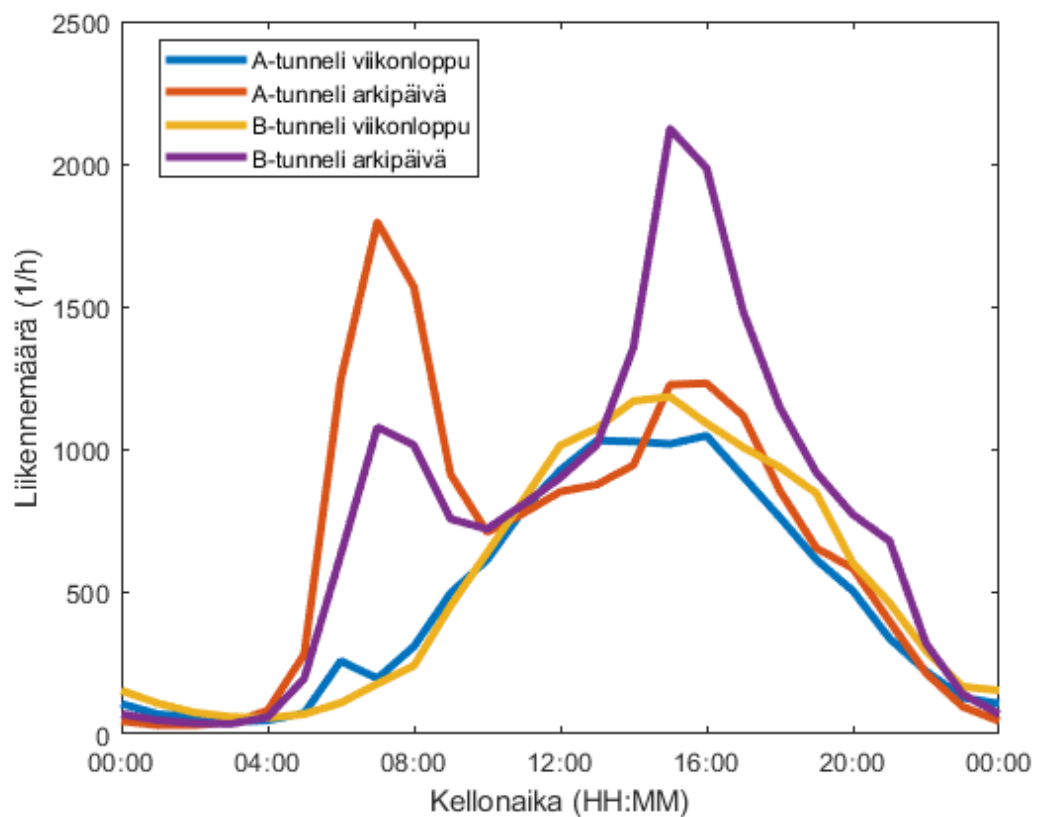


Kuva 8. B-tunnelin tiesääaseman mittaama ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vuorokausikeskiarvo koko mittausten aikana

Lämpötila vaihteli paljon mittausten aikana. Suurimmat lämpötilat olivat positiivisilla lämpötiloilla, kun taas kylmimmät lämpötilat olivat lähes -20 astetta pakkasella. Kylmin ajanjakso osui helmikuun loppuun ja lämpimiä ajanjaksoja löytyy niin tammi-, helmi-

kuin maaliskuussakin. Lämpötilan keskiarvo mittausten aikana oli $-6.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suhteellinen ilmankosteus vaihteli välillä 65 % - 100 %. Tammi- ja helmikuun ajan ilmankosteus pysyi suhteellisen vakiona (noin 90%-95% lukuun ottamatta tammikuun alkupuoliskoa). Maaliskuussa oli hyvin paljon vaihtelua kosteudessa. Kosteus saavuttikin huippunsa ja miniminsä juuri maaliskuun aikana. Ilman suhteellisen kosteuden keskiarvo tunnelissa mittausten aikana oli $89\text{ } \% \pm 10\text{ } \%$.

Kuvassa 9 on esitetty A- ja B-tunnelin keskimääräinen liikennemäärä vuorokaudessa tammi-maaliskuun aikana. Kuvaan on eritelty arkipäivät ja viikonloput. Liikennemäärät on mitattu A- ja B-tunnelin sisään-tuloaukon kohdalta tunnin keskiarvoina. Kyseessä on kokonaisliikennemäärä, eli kevyt ja raskas liikenne on laskettu yhteen.



Kuva 9. A- ja B-tunnelin liikennemäärien keskimääräinen tuntikeskiarvo arkipäivisin sekä viikonloppuisin tammi-maaliskuussa.

Molemmissa tunneleissa havaittiin kasvaneita liikennemääriä aamuisin kello 7:00-8:00. Tämä on liikennemäärän nousu aamuisin on todennäköisesti aamuruuhkaa. A-tunnelissa tämä aamuruuhkan aiheuttama piikki oli huomattavasti isompi kuin B-tunnelissa. A-tunneli onkin kaupunkiin johtava tunneli, joten todennäköisesti aamulla kaupungin keskustan ulkopuolella asuvat ihmiset ajoivat A-tunnelin läpi töihin kaupunkiin. Iltapäivällä näkyi myös iltapäiväruuhkan aiheuttama piikki noin kello 16:00 aikoihin. Tämä iltapäiväruuhkan aiheuttama piikki on suurempi B-tunnelissa. Todennäköisesti kaupungin ulkopuolella asuvat ihmiset ajoivat työpäivän jälkeen kotiin B-tunnelia pitkin.

Viikonloppuisin A- ja B-tunnelissa liikennemäärät olivat hyvin samankaltaisia. Viikonloppuisin liikennemäärät olivat pienempiä kuin arkipäivisin ja aamulla ei ollut minkäänlaista aamuruuhkan aiheuttamaa piikkiä, vaan liikenne kasvoi tasaisesti kohti päivää. Viikonloppuisin suurin liikennemäärän saavutettiin hiukan aikaisemmin kuin arkipäivisin.

Arkipäivisin A-tunnelissa yhden vuorokauden liikennemäärä oli 16000 ± 2200 1/vrk ja B-tunnelissa 18000 ± 2600 1/vrk. Viikonloppuisin yhden vuorokauden liikennemäärä A-tunnelissa oli 12000 ± 1600 1/vrk ja B-tunnelissa 13000 ± 1700 1/vrk. Raskaiden ajoneuvojen osuus koko liikennemäärästä oli A- ja B-tunnelissa 3% arkipäivisin sekä 1% viikonloppuisin.

4.6 Tulostenkäsittely

Aluksi mittauspöytäkirjan perusteella karsittiin pois data, joka oli mennyt syystä tai toisesta pilalle. Mobiililaboratoriomittauksissa joissakin tapauksissa edellä oleva auto aiheutti merkittäviä paikallisia päästöjä, jotka olisivat vaikuttaneet liikaa mittaustuloksiin. Nämä tapaukset olivat merkittyinä mittauspöytäkirjaan ja niitä karsittiin pois. Mittausten jälkeen kaikki data yhdistettiin Matlabissa. Molemmille mittauksissa käytetyille ELPI:ille tehtiin nollatasojen korjaus mittausten aikana tehtyjen nollamittausten avulla ja data käsiteltiin hiukkasten lukumääräkokojakaumiksi. Hiukkaskokojakaumien avulla pystyttiin laskemaan myös kokonaistilavuus ja -massa, kun oletetaan että hiukkaset ovat muodoltaan palloja. Massa voidaan laskea kaavalla

$$M = \rho \sum \pi \frac{d_p^3}{6} \frac{dN}{d \log d_p} d \log d_p, \quad (4.6.1)$$

jossa ρ on hiukkasten tiheys. Tiheys muuttuu hiukkasen koon funktiona. Virtanen *et al.* (2006) sai liikenteestä aiheutuvien hiukkasten tiheydeksi $1.0 \text{ g/cm}^3 \sim 20 \text{ nm}$ hiukkasille ja $1.5 \text{ g/cm}^3 \sim 70 \text{ nm}$ hiukkasille. Hussein *et al.* (2008) käytti isoille katupölyhiukkasille tiheyden arvoa 2.8 g/cm^3 .

Mobiililaboratoriomittauksissa käytetyissä laitteissa aikaleimat synkronoitiin, sillä mittaauksissa käytettiin kahta kannettavaa tietokonetta, joiden aika poikkesi toisistaan. Aikaleimojen synkronointiin käytettiin hyväksi tietoa, että kaasujen ja hiukkasten pitoisuus laskee huomattavasti mentäessä tunnelista ulkoilmaan. Näin pystyttiin määrittämään aina tarkka ajankohta, jolloin tunnelista poistuttiin. Lisäksi jokaisen tunnelin läpiajon data interpoloitiin samalle etäisyysvektorille. Mittauspöytäkirjaan oli merkitty aika, jolloin tunneliin ajettiin ja milloin tunnelista ajettiin pois. Täten pystyttiin määrittämään aika, joka kului tunnelin läpi ajamiseen. Kun oletettiin, että tunnelissa ajettiin tasaista nopeutta (60 km/h , joka pyrittiin pitämään jokaisessa läpiajossa mahdollisimman vakiona), pystyttiin yhden läpiajon data interpoloimaan samalle etäisyysvektorille. Näin pystytään esittämään mittaustulokset etäisyyden funktiona.

ELPI:n mittaamista kokojakaumista pystyttiin myös laskemaan hiukkasten aiheuttama teoreettinen kokonaisekstinktio. Ekstinktion laskemiseen käytettiin Christina Mätzlerin

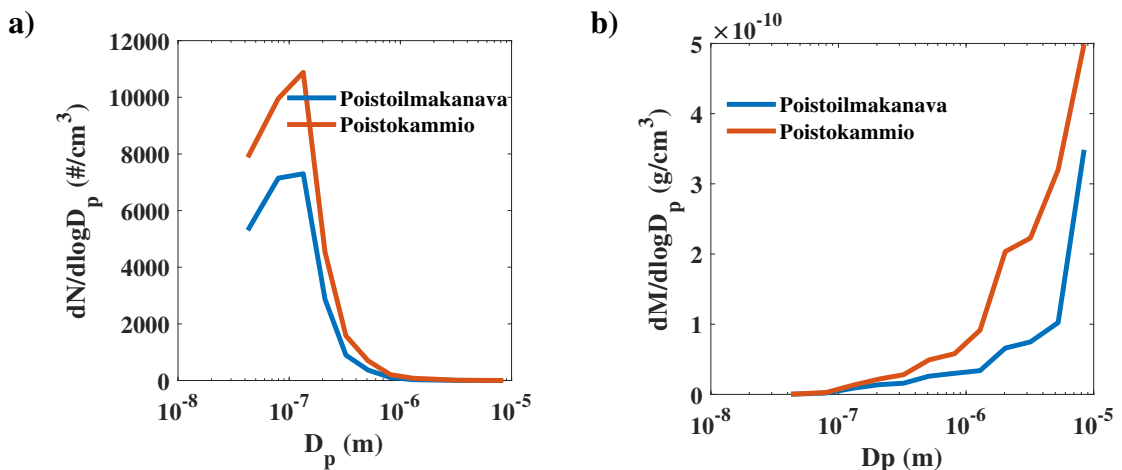
tekemää Matlab-koodia (Mätzler 2002), joka laskee Mie-teorian pohjalta hiukkasten aiheuttaman ekstinktion. Ohjelmalle annetaan parametriksi kokoparametri x ja taitekerroin m ja se palauttaa ekstinktiiovakion lisäksi absorptiovakion ja sirontavakion. Laskemiseen käytettiin kolmea eri taitekerrointa, joista laskettiin keskiarvo. Taitekertoimina käytettiin orgaanisen hiilen taitekertoimia aallonpituuksilla 467 nm, 530 nm ja 660 nm, jolloin taitekertoimet olivat $1.59 + 0.11i$, $1.47 + 0.04i$ ja $1.47 + 0i$. Koodin antaman ekstinktiotehokkuuden avulla laskettiin ekstinktiopinta-ala kaavan (2.0.3) mukaisesti olettaen pallomaiset hiukkaset jokaiselle ELPI:n mittaamalle hiukkaskoolle. Lopulta koko hiukkaspopulaation ekstinktiiovakio laskettiin kaavan (2.0.8) mukaan.

5. TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään tämän tutkimuksen tuloksia. Aluksi esitellään tunnelissa mitattuja hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksia sekä lukumäärä- ja massakokojakaumia, jonka jälkeen keskitytään tunnelin aerosolin optisiin ominaisuuksiin. Tämän jälkeen pohditaan tunnelissa vallitsevan tuuletuksen, pesun ja meteorologisten parametrien vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion. Suurin osa tuloksista esitetään keskiarvoina joltakin aikaväliltä. Tulosten keskihajontaa käsitellään kappaleen lopussa.

5.1 Tunnelissa mitatut hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuudet sekä hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumat

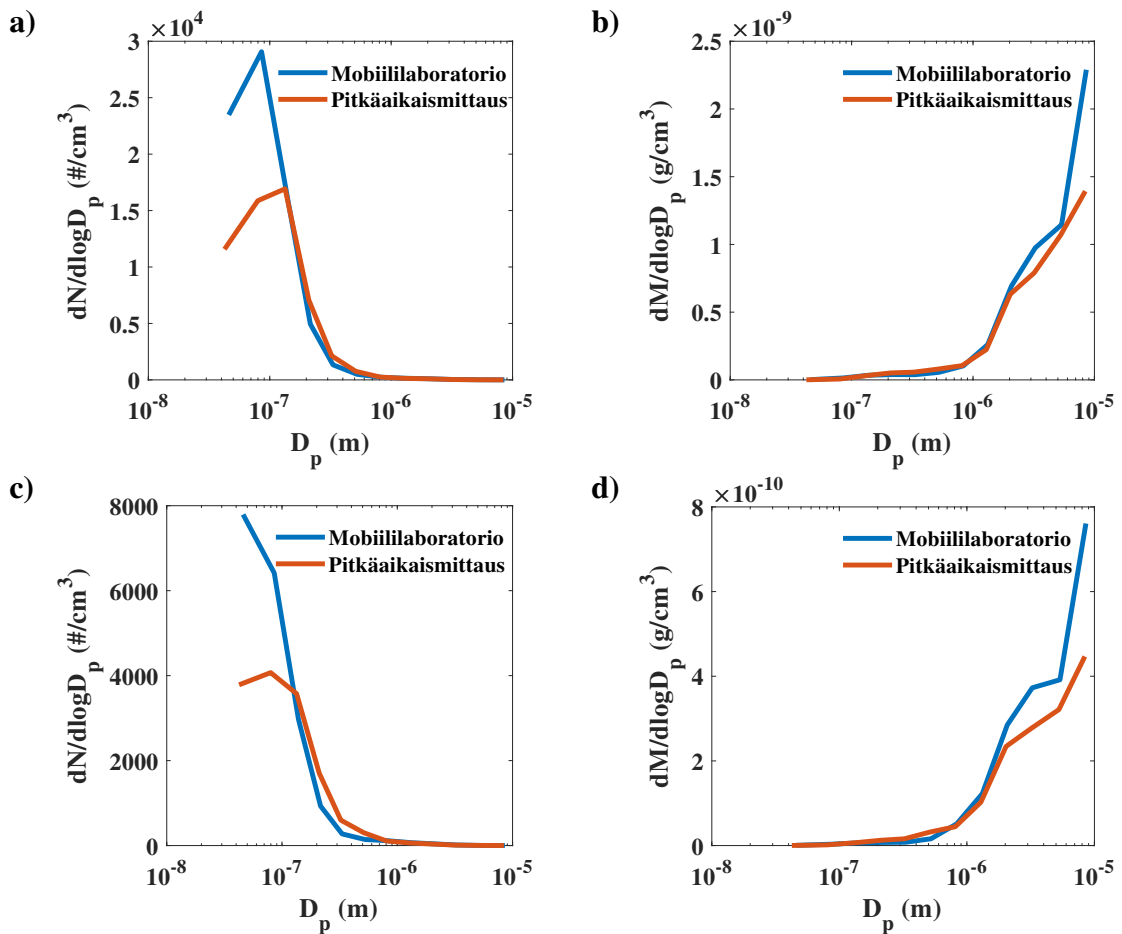
Kuvassa 10 on esitettyä pitkäaikaismittauksissa käytetyn ELPI:n mittaama hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakauman keskiarvo B-tunnelin poistoilmakanavassa (mitattu 8.1.-14.2.) sekä poistokammiossa (mitattu 14.2.-8.3.). Mitatut hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumat olivat kaikissa tutkituissa hiukkaskoissa suuremmat poistokammiossa kuin poistoilmakanavassa. Poistokammio oli heti tunnelin viereisessä tilassa, mutta poistoilmakanavan näytteenottoaika oli kauempana tunnelista. Poistoilmakanavan pitoisuuksia mitattaessa näytteen oli siis pitänyt kulkea pidempi matka poistoilmakanavissa. Hiukkasia oli todennäköisesti hävinnyt tällä matkalla esimerkiksi deponoitumalla poistoilmakanavan seinämiin. Lisäksi mitattaessa poistoilmakanavassa näytteenotossa oli saattanut tapahtua hiukkahäviöitä, jotka ovat saattaneet vaikuttaa tuloksiin. Poistokammioista mitattu data kuvaa siis paremmin tunnelin loppuosassa vallitsevia olosuhteita.



Kuva 10. Pitkäaikaismittauksissa käytetyn ELPI:n mittaama hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumien keskiarvot mittausten aikana Tampereen Rantatunnelista.

Kuvassa 10 hiukkasten massakokojakauma oli painottunut karkeisiin hiukkasiin. Massa-

kokojakauman huippu onkin selkeästi ELPI:n mittausalueen ulkopuolella eli yli $10\ \mu\text{m}$:n kokoisissa hiukkasissa. Tunnelissa oli siis merkittäviä määriä myös isoja hiukkasia, vaikka niitä lukumäärällisesti on vähän verrattuna pienempiin hiukkasiin. Nämä isot hiukkaset ovat todennäköisesti katupölyä, sillä kuten kappaleessa 3.2 todettiin, katupölyhiukkaset ovat tyypillisesti kokoluokaltaan yli $1\ \mu\text{m}$:n kokoisia. Poistoilmakanavamittauksissa hiukkasten lukumääräpitoisuuden huippu on $0.1\ \mu\text{m}$:n hiukkaskoossa. Nämä hiukkaset ovat todennäköisesti peräisin autojen pakokaasupäästöistä, sillä autojen pakokaasupäästöjen hiukkaset ovat tyypillisesti alle $2.5\ \mu\text{m}$:n kokoisia.

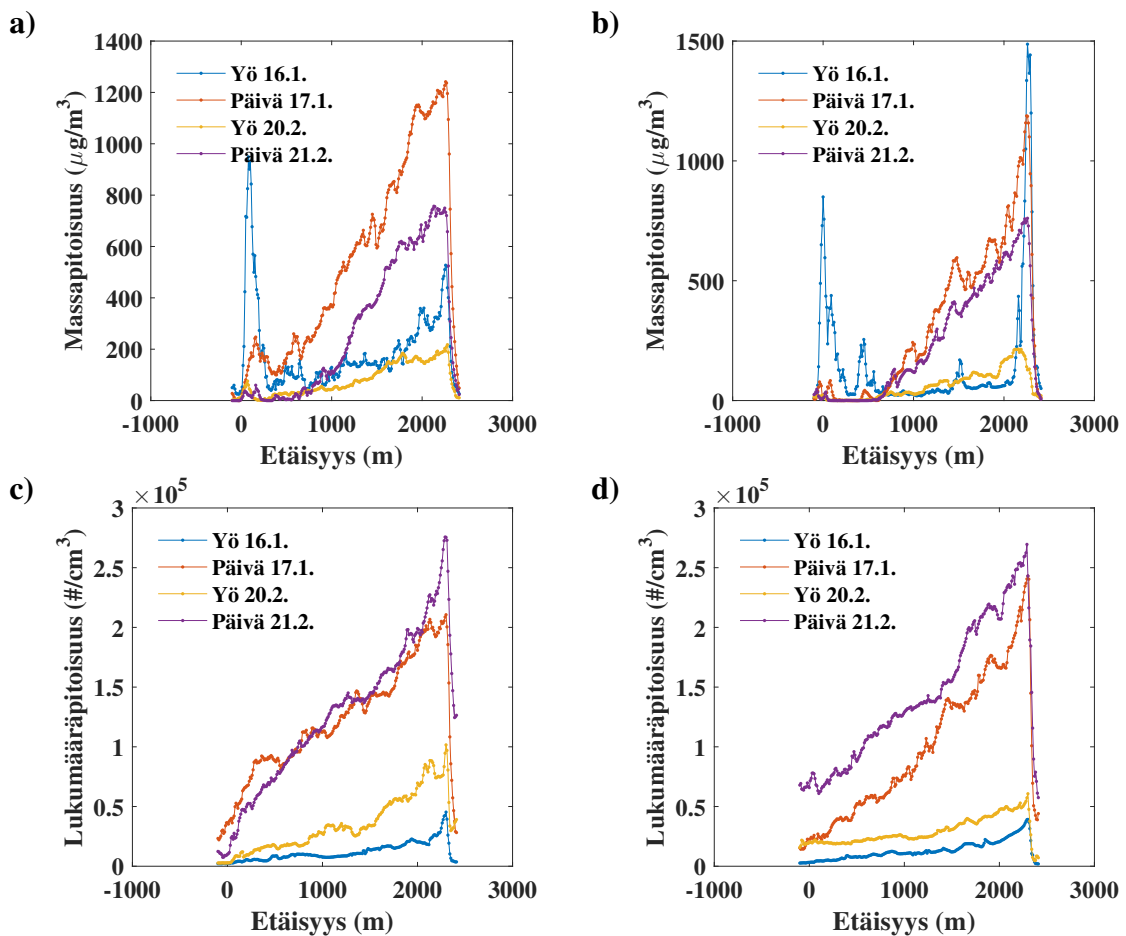


Kuva 11. Mobiililaboratoriomittausten aikana mitatut ja samaan aikaan pitkäaikaismittauksissa mitatut a) hiukkasten lukumääräkokojakauma päivällä 21.2. b) hiukkasten massakokojakauma päivällä 21.2. c) hiukkasten lukumääräkokojakauma yöllä 20.2. d) hiukkasten massakokojakauma yöllä 20.2. Mobiililaboratoriomittausten osalta kuvassa on otettu mukaan vain tunnelin 100 viimeisen metrin matkalla tehdyt mittaukset.

Jotta saadaan selville, kuinka hyvin poistokammiossa mitatut hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumat kuvaavat tunnelin sisällä olevaa hiukkaspopulaatiota, voidaan vertailla mobiililaboratoriomittauksissa mitattuja hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumaa pitkäaikaismittauksissa mitattuihin vastaaviin arvoihin. Kuvassa 11 on esitettyä B-tunnelissa 20.2. klo 22:00 - 03:00 ja 21.2. klo 14:00 - 19:00 suoritettujen mobiililaboratoriomittausten aikana ELPI:n mittaamat hiukkasten lukumäärä- sekä massakokojakaumat. Lisäksi kuvassa

on esitettyä pitkäaikaismittauksissa käytetyn ELPI:n mitaamat hiukkasten lukumäärä- sekä massakokojakaumat samalta aikaväliltä. Kuvan perusteella tunnelin sisällä (mobiililaboratoriolla tehtyt mittaukset) vallitsee hyvin samanlainen hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakauma niin yöllä kuin päivällä verrattuna pitkäaikaismittauksiin. Eroja löytyy hiukkasten lukumääräkokojakauksissa pienillä hiukkasilla sekä hiukkasten massakokojakaumissa isoilla hiukkasilla. Jakaumien samankaltaisuus viittaa siihen, että poistokammion mittaustuloksia voidaan siis käyttää tunnelin sisällä olevan hiukkaspopulaation arviointiin.

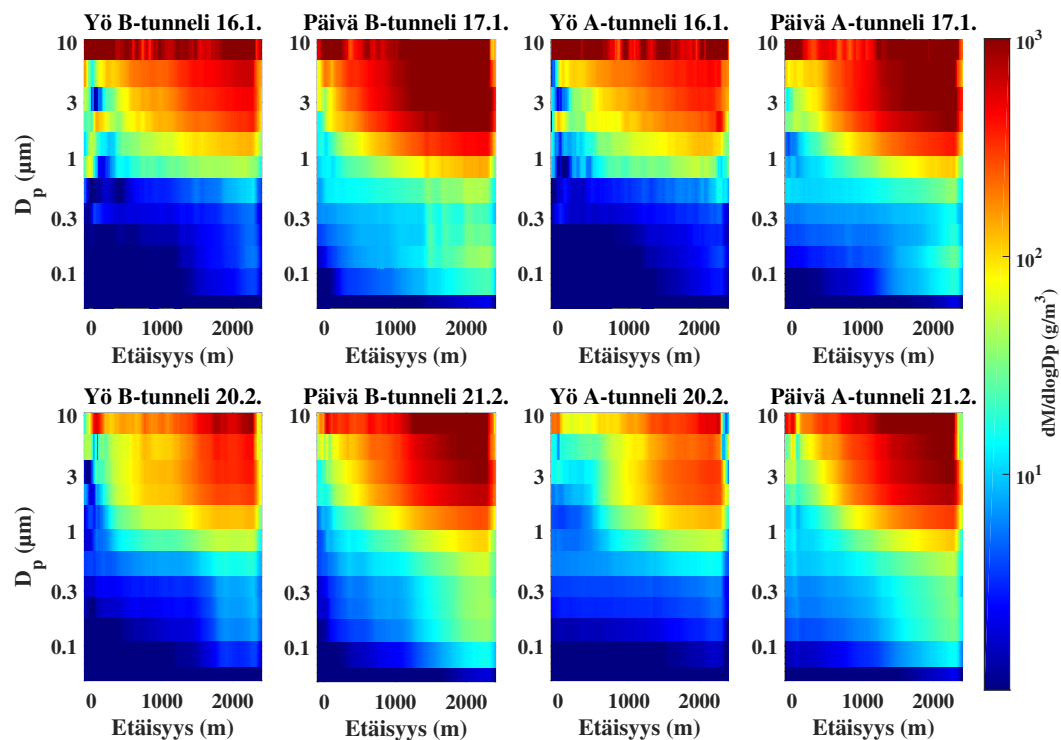
Kuvassa 12 on esitettyä ELPI:llä mitatut hiukkasten massa- sekä lukumääräpitoisuuden keskiarvot tunnelin alusta olevan etäisyyden funktiona kaikissa mobiililaboratoriomittauksissa.



Kuva 12. Kuvassa ELPI:n mitaama a) hiukkasten massapitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona b) hiukkasten massapitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona c) hiukkasten lukumääräpitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona d) hiukkasten lukumääräpitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona. Tunnelin alku on 0 metrin kohdalla ja loppu on 2300 metrin kohdalla.

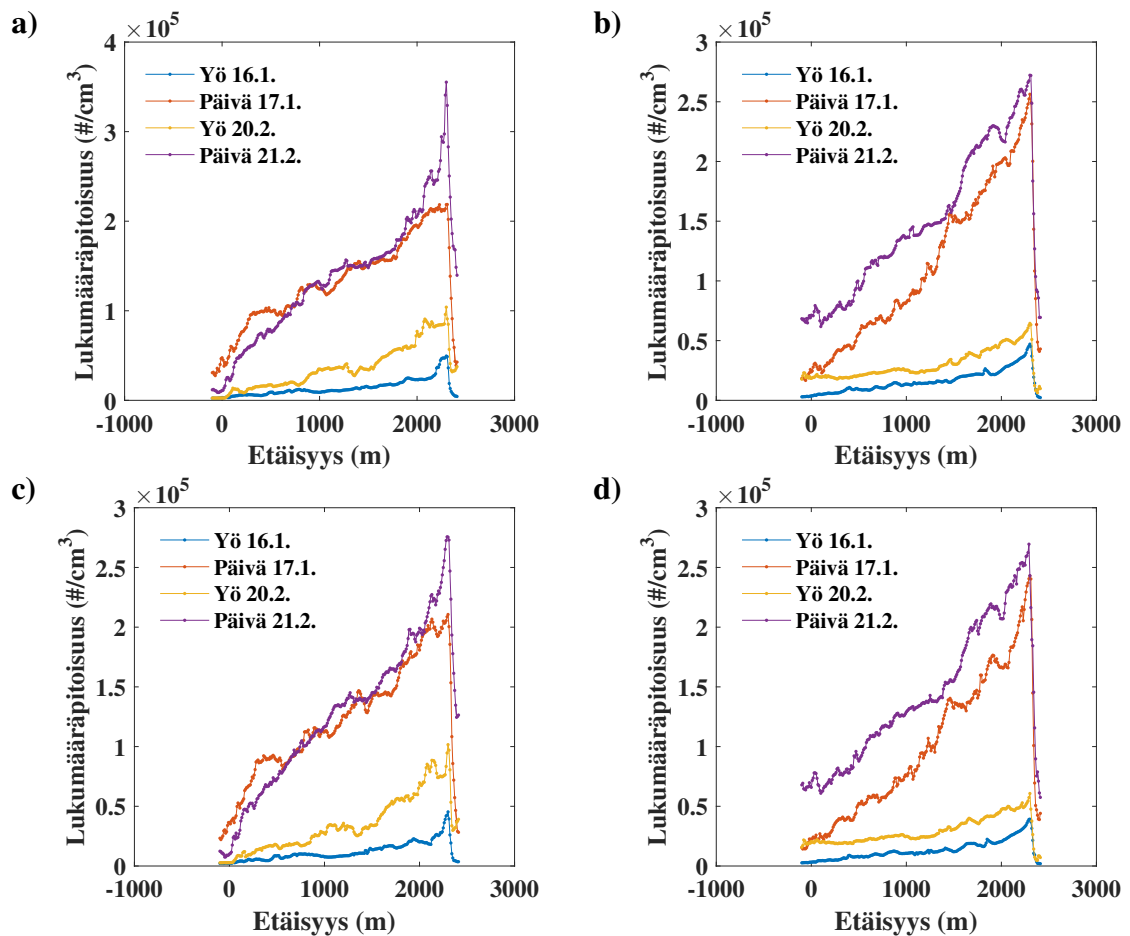
Tunneli-ilman hiukkasten massapitoisuus kasvoi selvästi lähestyttäessä tunnelin loppua. Massapitoisuus nousi öisin alle $50 \mu\text{m}$:stä $500 \mu\text{m}$:iin ja päivisin alle $50 \mu\text{m}$:stä jopa lähes $1200 \mu\text{m}$:iin. Massapitoisuus saavutti huippunsa juuri ennen tunnelin loppua ja tippui nopeasti tunnelin jälkeen takaisin taustapitoisuuksiin. Päivisin hiukkasten massapi-

toisuudet olivat pääosin suurempia, todennäköisesti johtuen suuremmasta liikennemäärästä. Kuitenkin A- ja B-tunnelissa ensimmäisen yömittauksen aikana havaittiin hyvin suuria hiukkasten massapitoisuuksia myös tunnelin alussa. Tämä ilmiö oli havaittavissa muissakin mittauksissa, mutta ei kuitenkaan yhtä selkeänä. Ensimmäisen yömittauksen aikana havaittiin myös hyvin suuria hiukkasten massapitoisuuksia A-tunnelin lopussa. Muuten A-tunnelissa hiukkasten massapitoisuus on samaa luokkaa toisen yömittauksen kanssa. Hiukkasten lukumääräpitoisuus käyttäytyi vastaavasti kuin hiukkasten massapitoisuus. Hiukkasten lukumääräpitoisuuskin kasvoi öisin $0.1 \cdot 10^5 \# / \text{cm}^3$:sta $1 \cdot 10^5 \# / \text{cm}^3$:een ja päivisin $0.3 \cdot 10^5 \# / \text{cm}^3$:sta $2.7 \cdot 10^5 \# / \text{cm}^3$:een. Päivisin hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat huomattavasti suuremmat kuin yöllä, joka johtunee liikenteen aiheuttamista pako-kaasupäästöistä. Hiukkasten lukumäärissä ei havaita piikkejä ensimmäisen yön lopussa tai tunnelin alussa. Tämä viittaa siihen, että kuvassa 12 havaitut massapiikit johtuivat isoista hiukkasista, joilla on paljon massaa. Hiukkasten massapitoisuudet olivat korkeimmillaan ensimmäisissä mittauksissa (yöllä 16.1. ja päivällä 17.1.). Kuitenkin hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat suurempia kahdessa jälkimmäisessä mittauksessa (yöllä 20.2. ja päivällä 21.2.).



Kuva 13. ELPI:n mitaama tunneli-ilman hiukkasten massakokojakauma etäisyyden funktiona. Y-akselilla on hiukkaskoko, x-akselilla etäisyys tunnelin alusta. Väri kuvaa hiukkasten massapitoisuutta (mitä punaisempi, sitä suurempi pitoisuus sillä hiukkaskoolla). Kuvan oikealla puolella on esitettyä A-tunnelin tulokset ja vasemmalla puolella B-tunnelin tulokset. Ylärivissä on ensimmäisten kahden mobiililaboratoriomittauksen tulokset ja alarivillä on kahden jälkimmäisen mobiililaboratoriomittauksen tulokset.

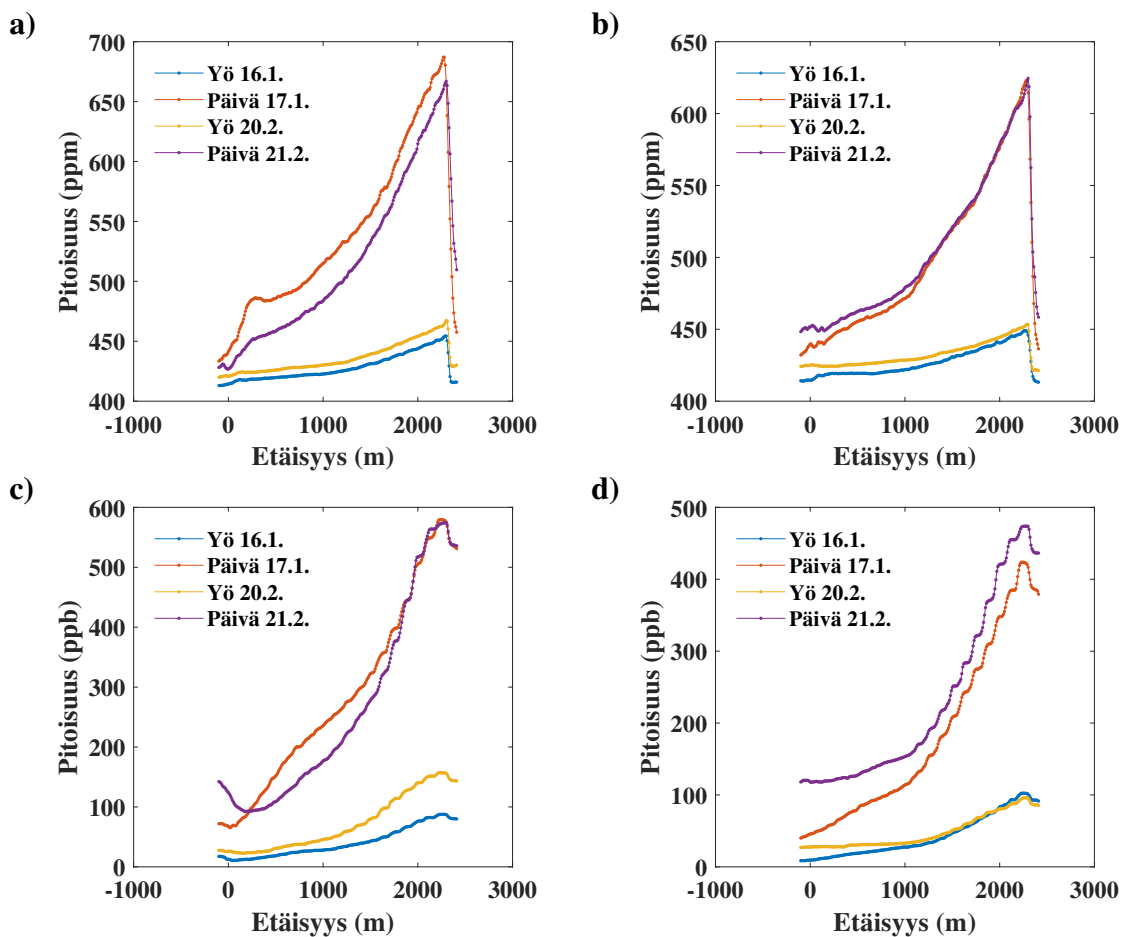
Tunneli-ilman hiukkasten massapitoisuutta voidaan tutkia myös massakokojakaumien avulla. Kuvassa 13 on tunneli-ilman hiukkasten massakokojakaumat eri mittauskertoina tunnelin alusta olevan etäisyyden funktiona. Tunneli-ilman hiukkasten massapitoisuus kasvoi selkeästi tunnelin loppua kohti. Isoimpia hiukkasia, joita ELPI pystyy mittamaan ($10\ \mu\text{m}$) havaitaan kuitenkin myös tunnelin keskivaiheilla ja alussa. Päivisin oli havaittavissa myös pienempien hiukkasten massapitoisuuksien kasvua tunnelin loppua kohti. Nämä hiukkaset olivat todennäköisesti peräisin liikenteen pakokaasupäästöistä. Kaiken kaikkiaan hiukkasmassapitoisuudet olivat selvästi painottuneet isoihin hiukkasiin, eli suurin osa tunneli-ilmassa olevasta hiukkasmassasta on hiukkaskoosta päätellen peräisin katupölystä. Jokaisessa tapauksessa suurin mitattu massapitoisuus oli $10\ \mu\text{m}$ kokoisilla hiukkasilla, joka on ELPI-mittalaitteen mittauksen yläraja hiukkaskokomittauksille. Myös tämä viittaa siihen, että tunnelissa olisi myös merkittäviä määriä yli $10\ \mu\text{m}$ hiukkasia, jotka ovat ELPI:n mittausalueen ulkopuolella. Tunnelin alussa oleva massapiikki havaitaan kuvan 12 tavoin kuvassa 13, erityisesti ensimmäisten yömittausten aikana. Nämä näkyivät suurina massapitoisuuksina isoissa hiukkasissa. Yhtenä mahdollisuutena tällaisen hiukkasmassapiikin syntymiseen on se, että autojen ajaessa tunneliin syntyy paine-eron takia virtaus, joka nostaa pientareilla olevaa pölyä ilmaan juuri tunnelin suuaukon kohdalla.



Kuva 14. Tunneli-ilman hiukkasten lukumääräpitoisuus B-tunnelissa a) PSM:n mittaamana b) CPC:n mittaamana sekä hiukkasten lukumääräpitoisuus A-tunnelissa c) PSM:n mittaamana ja d) CPC:n mittaamana.

ELPI:n lisäksi hiukkasten lukumääräpitoisuutta tunneli-ilmassa mitattiin myös CPC:llä ja PSM:llä. Näiden tulokset on esitetty kuvassa 14. CPC:n ja PSM:n mitaamat hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat hyvin samankaltaiset kuin ELPI:n mitaamat hiukkasten lukumääräpitoisuudet. Hiukkasten lukumääräpitoisuus kasvoi kohti tunnelin loppua ja päivisin mitattiin huomattavasti suurempia hiukkasten lukumääriä kuin öisin. PSM:n mitaamat hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat kaikista suurimpia. Tämä johtuu siihen, että PSM mittaa laajempaa hiukkaskokoaluetta verrattuna CPC:hen tai ELPI:in.

Tässä tutkimuksessa tunneli-ilmausta mitattiin hiukkasten lukumäärien lisäksi CO_2 :n ja NO_x :n pitoisuuksia. Kuvassa 15 on esitetty CO_2 - ja NO_x -kaasujen pitoisuudet etäisyyden funktiona tunnelissa. Molempien kaasujen pitoisuudet kasvoivat kohti tunnelin loppua hiukkasmittausten tavoin. Päivisin kaasujen pitoisuudet olivat huomattavasti suurempia kuin öisin. Tämä johtunee liikenteen vaikutuksesta, sillä CO_2 - ja NO_x -päästöt ovat pääosin peräisin liikenteen pakokaasupäästöistä.

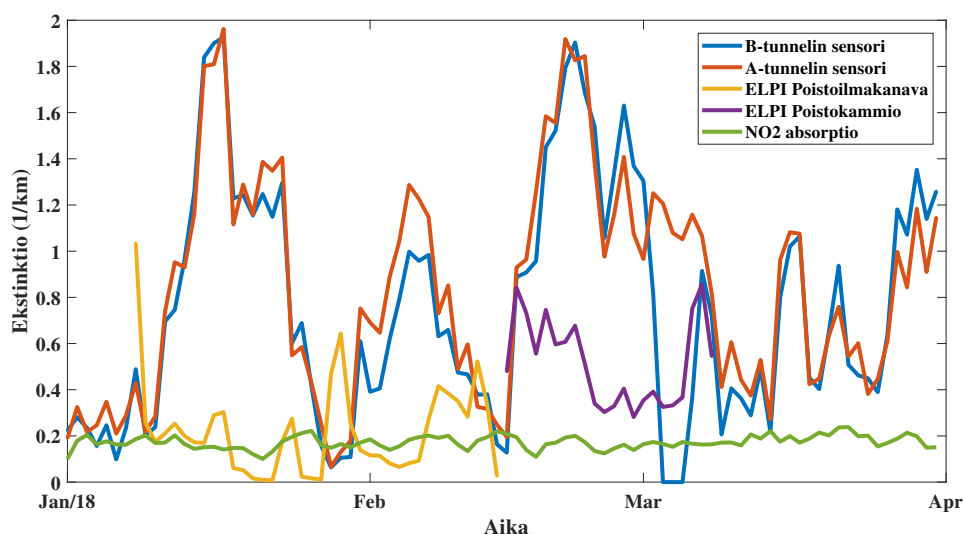


Kuva 15. Kuvassa on (a) CO_2 -pitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona (b) CO_2 -pitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona (c) NO_x -pitoisuus B-tunnelissa etäisyyden funktiona (d) NO_x -pitoisuus A-tunnelissa etäisyyden funktiona. Tunnelin alku on 0 metrin kohdalla ja loppu 2300 metrin kohdalla.

5.2 Tunnelissa mitatun aerosolin optiset ominaisuudet

Tässä kappaleessa käsitellään tunneli-ilman aerosolin optisia ominaisuuksia. Kappaleessa käsitellään tunnelin sensorien mittaamia ekstinktioita, etalometrin mittaamia mustan hiilen pitoisuuksia ja hiukkasmittauksien ja kaasumittauksien datasta laskettuja teoreettisia ekstinktioita.

Kuvassa 16 on esitettyä ELPI:n mittaamista hiukkasten lukumääräkokojakaumista ja NO_2 :n pitoisuuksista laskettu tunneli-ilman teoreettinen ekstinktio sekä A- ja B-tunnelien sensorien mittaama ekstinktio aikaväliltä tammi-maaliskuu 2018. Kuvassa esitetyt A- ja



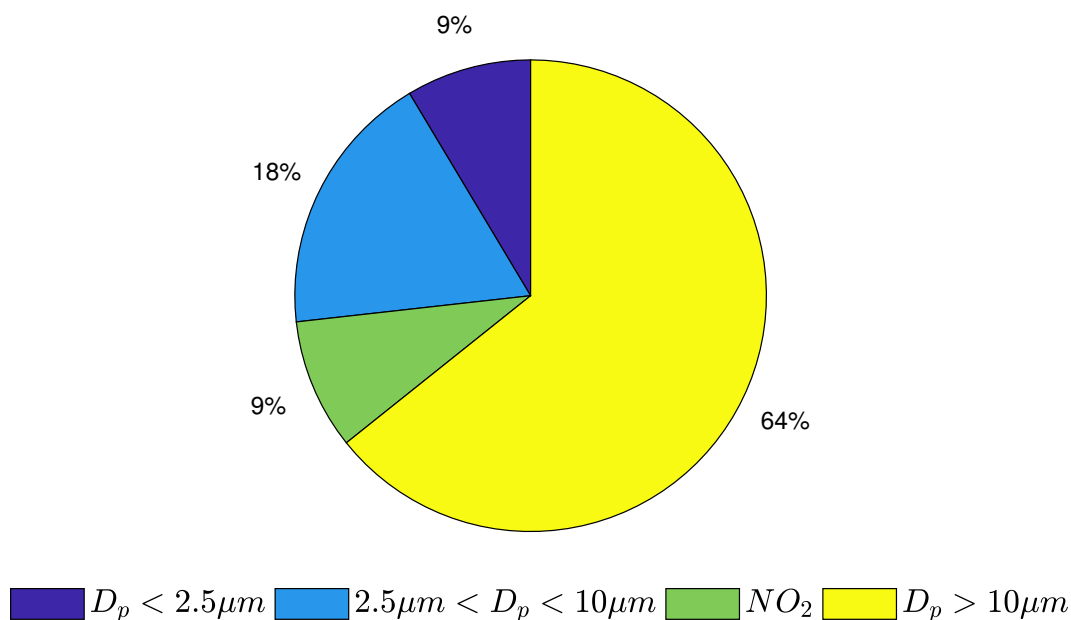
Kuva 16. Rantatunnelin sensoreiden mittaama ekstinktio sekä ELPI:n datasta teoreettisesti laskettu ekstinktion vuorokausikeskiarvo tammi-maaliskuun ajalta. Sensori, jonka data on esitetty, on A- ja B-tunnelien kolmas sensori ajosuuntaan. ELPI:n datasta on eritelty aika, jolloin ELPI oli sijoitettuna poistoilmakanavaan sekä poistokammioon.

B-tunnelin ekstinktiot on mitattu ajosuuntaan kolmannella sensorilla, sillä A-tunnelin viimeinen sensori ei ole välttämättä toiminut oikein mittausjakson aikana. Tässä työssä ekstinktio on aina esitettyä A- ja B-tunnelin ajosuuntaan nähden kolmannen sensorin mitaamana, ellei toisin ole mainittu. B-tunnelin sensorissa on ollut toimintahäiriö aikavälillä 28.2.-7.3., mikä näkyi mittausdatassa ekstinktion laskuna nolnaan. Tunneli-ilman ekstinktio vaihteli hyvin paljon mitausten aikana. Ekstinktio on korkeimmillaan ollut lähes 2 1/km tammikuun aikana ja helmi-maaliskuun vaihteessa. Alhaisimmillaan ekstinktio on ollut alle 0.2 1/km tammikuun lopussa ja helmikuun keskivaiheilla. A- ja B-tunneleissa mitatut ekstinktiot olivat hyvin samankaltaisia. A- ja B-tunneleissa mitatut ekstinktiot olivat jatkuvasti lähes yhtä suuria ja mitattujen ekstinktioiden vaihtelu tapahtuu yhtäaikaaisesti molemmissa tunneleissa. ELPI:n datasta laskettu teoreettinen ekstinktio oli huomattavasti pienempi kuin sensoreilla mitatut ekstinktiot. Varsinkin ELPI:n ollessa poistoilmakanavassa ELPI:n datasta laskettu teoreettinen ekstinktio oli hyvin pieni ja se myös poikkesi trendeiltään sensorien mittaamasta ekstinktiosta, kun taas poistokammioista mitatusta datasta lasketut ekstinktion arvot olivat suurempia ja ekstinktio seurasi paremmin sensorin

mittaamia trendejä. Kuitenkin tämäkin teoreettinen ekstinktio on huomattavasti pienempi kuin sensorien mittaama ekstinktio. NO_2 :sta aiheutuvan absorptio vuorokausikeskiarvo pysyy koko mittausjakson tasaisena, eikä suuria vaihteluita ole. Tämä on oletettavaa, sillä typpioksidipäästöt tunneliin ovat suurimmalta osin peräisin liikenteen päästöistä ja liikennemäärien vuorokausikeskiarvot ovat lähes vakioita. Näin myös typpioksidista aiheutuva absorptio pysyy lähes vakiona koko mittauksen ajan.

Tunnelin sensorit mittasivat ekstinktiota transmission avulla, joten sensoreiden mittaamassa ekstinktiassa on mukana kaikenkokoisten hiukkasten sekä eri kaasujen vaikutus. ELPI:n datasta lasketussa teoreettisessa ekstinktiassa on otettuna huomioon vain alle $10\text{ }\mu\text{m}$ kokoisten hiukkasten vaikutus. Aikaisemmin kuvien 12 ja 13 perusteella todettiin, että tunnelissa on todennäköisesti yli $10\text{ }\mu\text{m}$ hiukkasia huomattavia määriä. Nämä yli $10\text{ }\mu\text{m}$:n hiukkaset, voivat selittää teoreettisen ekstinktion ja sensorien mittaaman ekstinktion suuren eron.

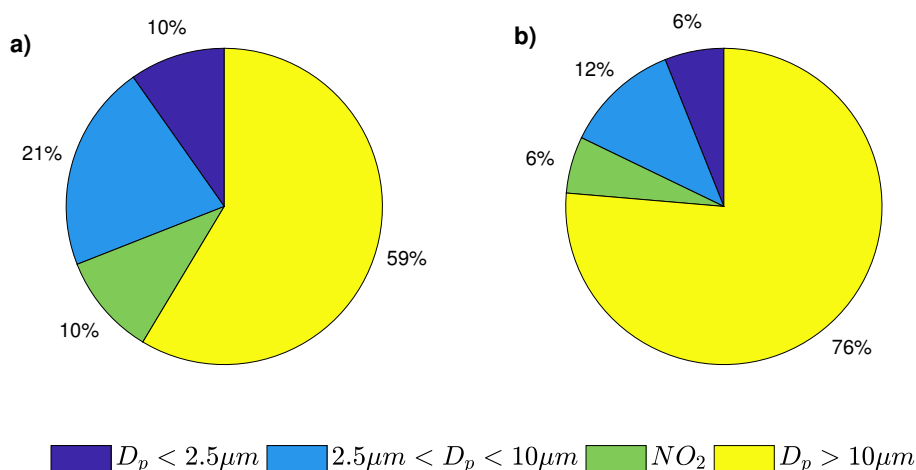
Sensoreiden mittamassa ekstinktiassa on mukana kaikkien hiukkasten ja kaasujen vaikutus, joten tätä ekstinktiota voidaan pitää tunneli-ilman kokonaisekstinktiona. Kun tiedetään sensorien mittaaman ekstinktion lisäksi alle $10\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten ja kaasujen aiheuttamat ekstinktiot, voidaan arvioida kuinka paljon eri komponentit ovat vaikuttaneet kokonaisekstinktion. Kuvassa 17 on esitettyä eri komponenttien vaikutus ekstinktion aikavälillä 14.2.-8.3. B-tunnelissa (eli ELPI:n ollessa poistokammiossa). Mukaan tarkaste-



Kuva 17. Eri komponenttien osuus kokonaisekstinktion aikavälillä 14.2.-8.3. B-tunnelissa

luun on otettu alle $2.5\text{ }\mu\text{m}$:n kokoiset hiukkaset, hiukkaset hiukkaskokoväliltä $2.5\text{ }\mu\text{m} - 10\text{ }\mu\text{m}$, yli $10\text{ }\mu\text{m}$:n hiukkaset sekä NO_2 . Kuvassa esitetty yli $10\text{ }\mu\text{m}$:n hiukkasten osuus on

saatu vähentämällä tunnelin sensoreilla mitatuista ekstinktiokertomista ELPI:n mittaamista hiukkasten lukumääräpitoisuuksista ja NO_2 pitoisuuksista lasketut ekstinktiokertoimet. Yli $10\text{ }\mu\text{m}$:n kokoiset hiukkaset vaikuttivat kaikista eniten kokonaisekstinktion; niiden osuus oli tarkastelussa 64 %:a. Pienien, eli alle $2.5\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten sekä NO_2 :n osuus oli pieni, molempien osalta 9 %:n osuudet. Hiukkasten, joiden koko on $2.5\text{ }\mu\text{m}$ – $10\text{ }\mu\text{m}$, vaikutus jää 18 %:iin. Kirjallisuuden mukaan autojen pakokaasupäästöt koostuvat pääosin alle $2.5\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisista hiukkasista ja ne sisältävät myös typpidioksidia. Tämän perustella voidaan olettaa, että liikenteen pakokaasupäästöillä on yhteensä 18 %:n vaikutus kokonaisekstinktion, sillä alle $2.5\text{ }\mu\text{m}$ sekä NO_2 on pääosin peräisin autojen pakokaasupäästöistä. Yli $2.5\text{ }\mu\text{m}$ hiukkaset ovat pääsääntöisesti katupölyä, joten katupölyn vaikutus ekstinktion on tarkastelun perusteella huomattavan suuri (82 %). Komponenttien vaikutus voi muuttua hyvin paljon riippuen kellonajasta. Tätä on tarkasteltu kuvassa 18, jossa eri komponenttien vaikutus on esitettyä yöaikaan (21:00-06:00) sekä päiväsaikaan (06:00-21:00). Päivällä alle $2.5\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten osuus sekä NO_2 :n osuus on hiukan suurempi kuin öisin, johtuen todennäköisesti suuremmasta liikennemäärästä. Myös yli $2.5\text{ }\mu\text{m}$:n, mutta



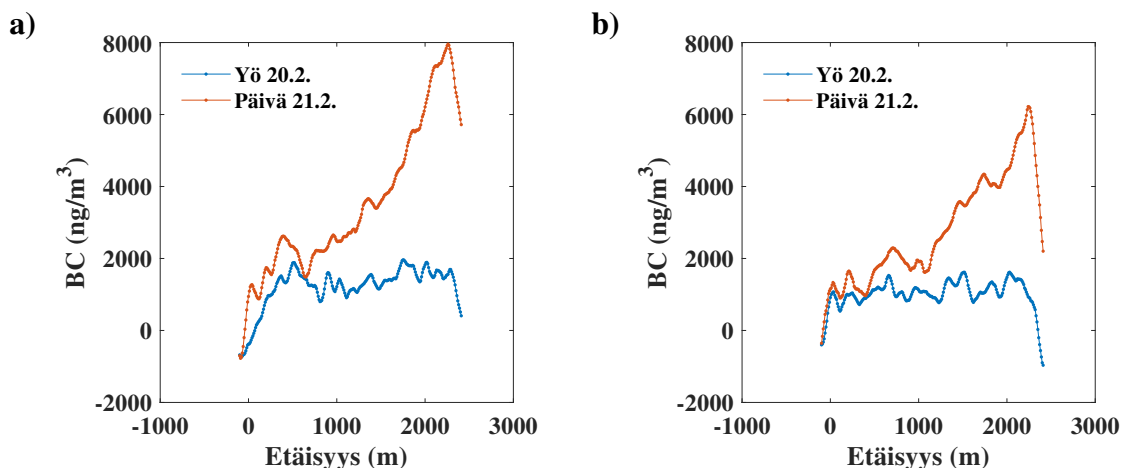
Kuva 18. Eri komponenttien osuus kokonaisekstinktiosta a) päivisin (06:00-21:00) b) öisin (21:00-06:00) aikavälillä 14.2.-8.3. B-tunnelissa

alle $10\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten osuus kasvaa päivisin. Todennäköisesti nämäkin hiukkaset ovat peräisin kasvaneen liikennemäärän aiheuttamista päästöistä. Isoin komponentti on kuitenkin niin öisin kuin päivisin yli $10\text{ }\mu\text{m}$:n kokoiset hiukkaset. Katupölyllä on siis merkittävä vaikutus kokonaisekstinktion ympäri vuorokauden riippumatta kellonajasta. Suurin vaikutus katupölyllä on öisin (76 % osuus). Päivisin katupölyn merkitys on hiukan pienempi 56 %:n osuudella.

Tämä tulos poikkeaa huomattavasti useista muista ekstinktiomittauksissa. Esimerkiksi Gao *et al.* (2015):in mukaan Kiinassa tehdyissä mittauksissa kaikista eniten kokonaisekstinktion vaikuttavat hiukkaset kokoväliltä $0.56\text{ }\mu\text{m}$ – $1.8\text{ }\mu\text{m}$ ja tätä isommilla hiukkasilla on vain pieni vaikutus kokonaisekstinktion. Vastaavia tuloksia on saanut myös Deng *et al.* (2008).

Myös teoria tukee tätä, sillä kuten kappaleessa 2.3 mainittiin, kaikista tehokkaimmin ekstinktion vaikuttavat hiukkaset kokoalueella $0.1 - 1 \mu m$. Kaikista isoimmat hiukkaset vaikuttavat epätehokkaimmin per yksikkömassa ekstinktion (ja samalla myös näkyvyyteen). Tässä tutkimuksessa tehdyt mittaukset ovat kuitenkin tehty hyvin poikkeuksellisissa olosuhteissa. Tunneli on hyvin rajoitettu ympäristö, eivätkä hiukkaset pääse leviämään yhtä tehokkaasti kuin ulkoilmassa. Lisäksi Suomessa käytetyt talvirenkaat ja teiden hiekoitus sekä suolaus nostavat karkeiden hiukkasten lukumäärää, kuten kappaleessa 3.2 todettiin. Vaikka karkeat hiukkaset eivät vaikuta yhtä tehokkaasti ekstinktion kuin pienhiukkaset, tässä tapauksessa ne vaikuttavat hyvin voimakkaasti kokonaisextinktion, sillä niitä on poikkeuksellisen paljon tunneli-ilmassa.

Tunneli-ilman aerosolin optisia ominaisuuksia voidaan tutkia vielä lisää etalometrin mitaaman datan avulla. Kuvassa 19 on esitettyä mobiililaboratoriomittauksissa mitattu tunneli-ilman mustan hiilen konsentraatio (BC) B- ja A-tunnelissa etäisyyden funktiona. Etalometri oli käytössä vain jälkimmäisissä mobiililaboratoriomittauksissa eli yöllä 20.2. sekä päivällä 21.2. Niin yöllä kuin päivällä konsentraatiot olivat taustapitoisuutta suuremmat tunnelin sisällä. Öisin BC-konsentraatio pysyi tasaisena koko tunnelin läpi,

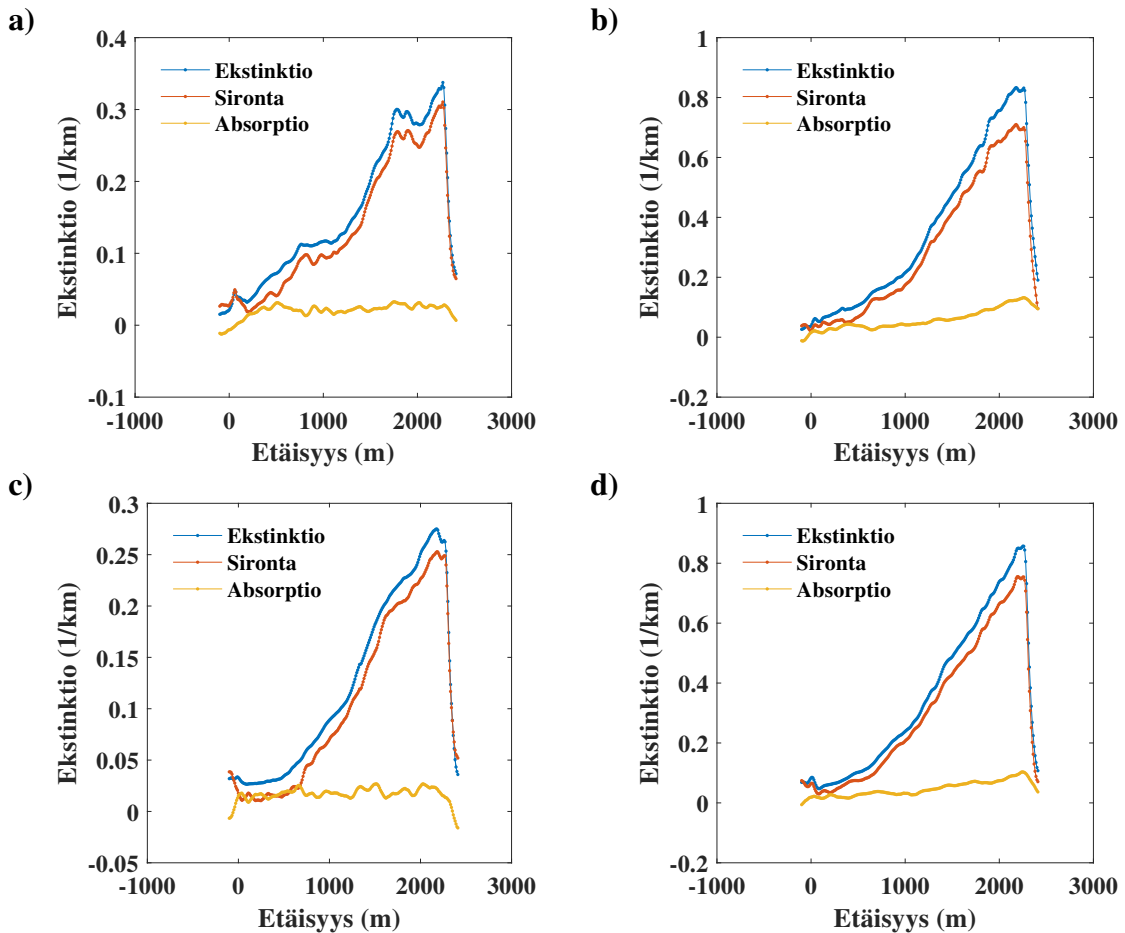


Kuva 19. Tunneli-ilman BC-pitoisuus a) B-tunnelissa ja b) A-tunnelissa jälkimmäisten mobiililaboratoriomittausten aikana.

kun taas päivällä BC-pitoisuudet kasvoivat kohti tunnelin loppua. Pitoisuus saavutti suurimman arvonsa (noin $6000-7000 \text{ ng/m}^3$) juuri tunnelin lopussa. A- ja B-tunnelin välillä ei ollut merkittävää eroa, B-tunnelissa BC-konsentraation maksimi oli hiukan suurempi. Verrattuna muihin Suomessa tehtyihin BC-mittauksiin BC-pitoisuuden maksimiarvo oli huomattavasti tavallista suurempi. Helsingissä tehdyissä mittauksissa BC-konsentraatio oli $1690 \pm 1460 \text{ ng/m}^3$ talviaikaan kaupungin keskustaa lähellä olevan kadun varressa. Ruuhka-aikaan BC-konsentraatio oli Helsingissä tehdyissä mittauksissa $2000-3000 \text{ ng/m}^3$ sekä öisin BC-konsentraatio oli alle 1000 ng/m^3 (Helin *et al.* 2018). Vastaavia tuloksia saatiin toisissa mittauksissa Helsingissä, jossa mitattiin BC-konsentraatioita 9 metrin päässä isosta maantiestä. Näissä mittauksissa aamuruuhkan aikana konsentraatio oli 2800 ng/m^3 ja öisin 730 ng/m^3 talviaikaisin (Pakkanen *et al.* 2006). Tässä mittauksissa mitatut arvot

olivat öisin koko tunnelin matkalta hiukan suurempia kuin Helsingissä tehdyissä mittauksissa. Erityisesti päivällä mitattu BC-konsentraation maksimi oli huomattavasti isompi. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tunnelissa aerosoli ei leviä ympäristöön suljetun tilan takia, vaan alkaa kerääntyä tunnelin loppua kohti.

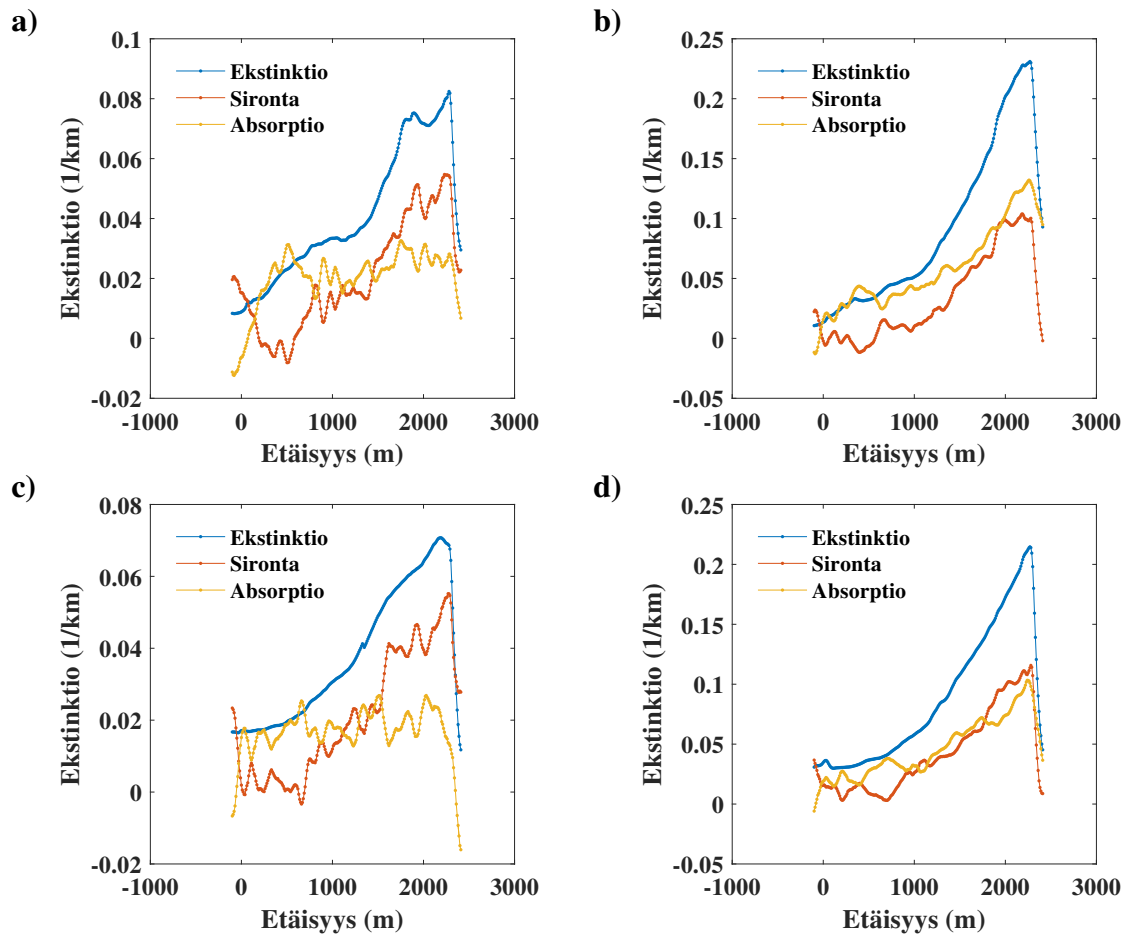
Etalometrin datasta pystytään määrittämään myös absorptiovakion arvo kaavan (4.2.6) avulla. Kuvassa 20 on esitettyä ekstinktiiovakio laskettuna ELPI:n datasta, absorptiovakio laskettuna etalometrin datasta sekä sirontavakio, joka on määritetty vähentämällä absorptiovakio ekstinktiiovakiosta kaavan (2.0.1) mukaisesti. Tunnelin alussa absorptiovakio on



Kuva 20. Ekstinktiiovakio, absorptiovakio ja sirontavakio a) B-tunnelissa yöllä 20.2. b) B-tunnelissa päivällä 21.2. c) A-tunnelissa yöllä 20.2. d) A-tunnelissa päivällä 21.2. etäisyyden funktiona. Sirontavakio on saatu vähentämällä ekstinktiiovakiosta absorptio. Absorptiovakio on määritetty etalometrin datasta ja ekstinktiiovakio ELPI:n datasta 30 nm - 10 μm :n kokoisille hiukkasille.

vain hiukan pienempi kuin ekstinktiiovakio, mutta tunnelin loppupäässä absorptio jää hyvin pieneksi verrattuna kokonaisekstinktioon. Hiukkasten aiheuttama ekstinktio johtuu siis pääosin hiukkasten aiheuttamasta sironnasta erityisesti tunnelin loppupäässä ja absorptiolla on vain pieni vaikutus kokonaisekstinktioon. Tunnelin alussa absorptiolla on kuitenkin merkitystä. Todennäköisesti tunnelin alussa liikenteen päästöillä, jotka tyypillisesti sisältävät paljon absorboivia hiukkasia, on suurempi vaikutus kokonaisekstinktioon,

jolloin myös absorptio on suurempi kokonaisextinktiosta. Ekstinktion ja sironnan avulla pystytään arvioimaan tunnelissa vallitsevaa yksittäissironnasta albedoa kaavan (2.0.19) mukaisesti. SSA on on matalimmillaan tunnelin alkupäässä, noin 0.6, mutta noin 1000 metrin jälkeen SSA saa arvon 0.8-0.9, joka pysyy tasaisena tunnelin loppuun asti. Nämä ovat tyypilliseen tunneliympäristöön hyvin korkeita SSA:n arvoja. Brasiliassa noin 2 km pituisessa tunnelissa tehtyjen mittauksissa saatiin tyypilliseksi SSA:n arvoksi 0.5-0.6 (Brito *et al.* 2013) ja USA:ssa tehdyissä tunnelimittauksissa SSA:n arvoksi saatiin 0.31 (Strawa *et al.* 2010). Yksi syy, mikä voi vaikuttaa tässä tutkimuksessa havaittuihin suuriin SSA:n arvoihin on katupölyn määrä tunnelissa. Kuvien 16 ja 17 perusteella todettiin, että tunnelissa on paljon isoja hiukkasia, jotka ovat todennäköisesti katupölyä. Katupöly tyypillisesti ei sisällä mustaa hiiltä, joten tyypillisesti katupöly sirotttaa enemmän valoa kuin absorptio. Tunneli-ilmassa on siis paljon sirottavaa katupölyä, jolloin absorptio vaikutus jää normaalia tunneli-olosuhteita pienemmäksi.



Kuva 21. Alle $1 \mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten aiheuttama ekstinktiokerto, absorptiokerto ja sirontakerto a) B-tunnelissa yöllä 20.2. b) B-tunnelissa päivällä 21.2. c) A-tunnelissa yöllä 20.2. d) A-tunnelissa päivällä 21.2. etäisyyden funktiona. Sirontakerto on saatu vähentämällä ekstinktiokerto absorptiokerto. Absorptiokerto on määritetty etalometrin datasta ja ekstinktiokerto ELPI:n mittaamien alle $1 \mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten lukumääräkokojakaumasta.

Etalometri mittaa mustan hiilen konsentraatiota, joka usein liitetään liikenteen pakokaasu-

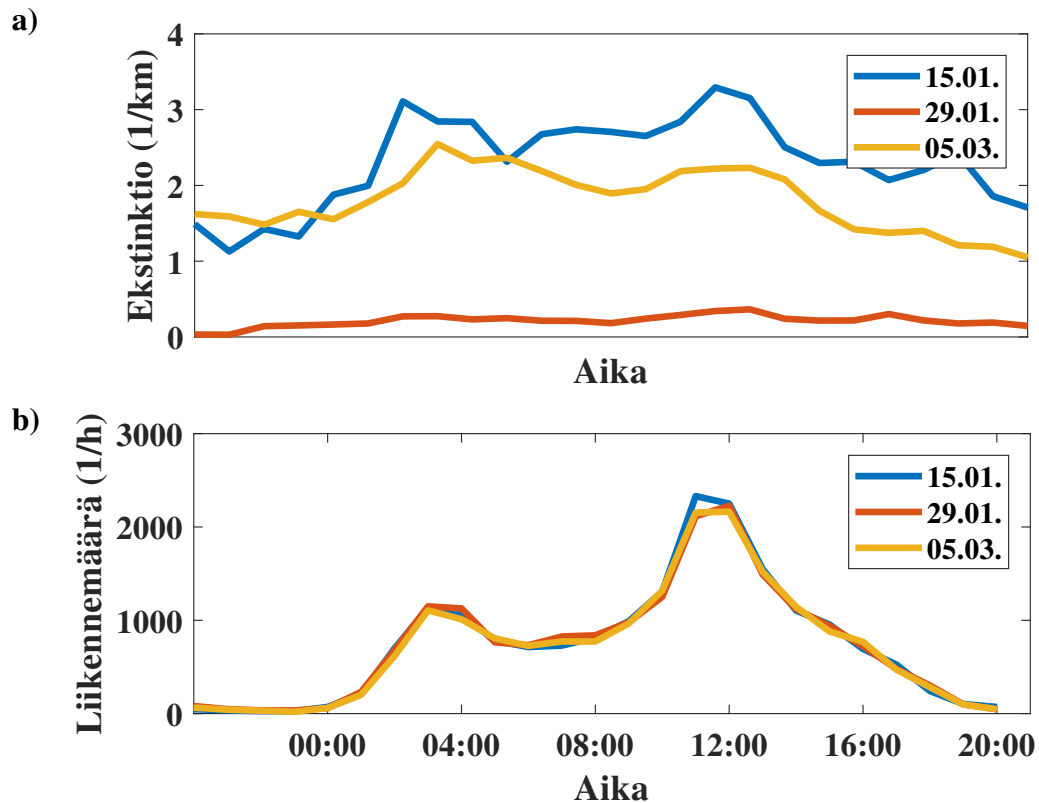
päästöihin. Liikenteen pakokaasun aiheuttamien aerosolihiukkasten optisia ominaisuuksia tunneli-ilmassa voidaan tarkastella tarkastelemalla alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten aiheuttamaa ekstinktiota, jotka ovat pääasiassa peräisin liikenteen päästöistä. Kuvassa 21 on esitettyä etalometrin mittaamasta datasta laskettu absorptiovakio, ELPI:n mittaaman alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten aiheuttama ekstinktio sekä sirontavakio, joka on saatu vähentämällä absorptiovakio ekstinktiovakioista. Jokaisessa tapauksessa tunneli-ilman absorptiovakio on lähes yhtä suuri tai suurempi kuin sirontavakio. Päivisin absorptiovakio on suurempi kuin öisin, joka selittyy suuremmalla liikennemäärällä. SSA:n arvo on hiukan suurempi kuin 0.5 päiväaikaan tunnelin lopussa ja yöaikaan hiukan alempi. Tunnelin alkupäässä SSA:n arvo on taas hyvin pieni, lähemmäs 0. Tunnelin alussa siis absorption vaikutus on hyvin suuri. Nämä tulokset vastaavat hyvin muita tunnelimittauksia, kuten Brito *et al.* (2013) ja Strawa *et al.* (2010) tekemiä mittauksia. Tyypillisessä tunnelissa liikenteen päästöillä on siis suuri vaikutus ekstinktion ja SSA:han. Rantatunnelissa liikenteen päästöt vaikuttavat talviaikaan vain vähän tunneli-ilmassa vallitsevaan ekstinktion, sillä Suomen olosuhteissa ilmaan päätyy suuria määriä katupölyä, joka hallitsee ekstinktiota.

5.3 Rantatunnelin tuuletuksen, pesun ja meteorologisten parametrien vaikutus tunneli-ilman ekstinktion

Rantatunnelin ilman näkyvyyteen ja ekstinktion vaikuttavat monet eri tekijät. Liikenne, tunnelien tuuletus, tunnelin pesun ajankohta, lämpötila ja kosteus kaikki vaikuttavat jollain tavoin ekstinktion. Tässä kappaleessa ensin käsitellään liikenteen ja kosteuden vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion, jonka jälkeen tarkastellaan lämpötilan vaikutusta ekstinktion. Näiden jälkeen pohditaan pesun vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion ja lopuksi käsitellään, kuinka tunnelin tuuletuksella voi vaikuttaa tunnelissa vallitsevaan ekstinktion.

5.3.1 Liikenteen vaikutus tunneli-ilman ekstinktion

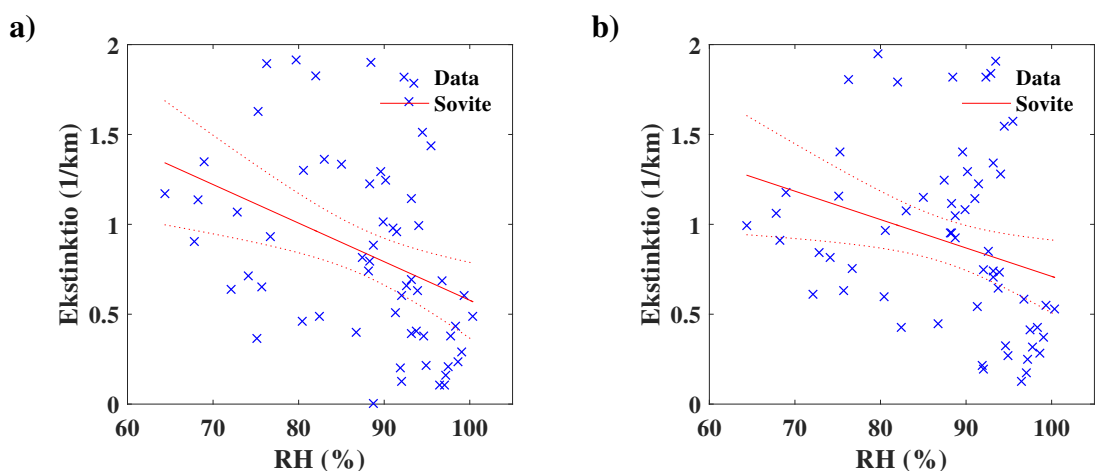
Kuvassa 22 on esitettyä B-tunnelin liikennemäärä ja tunneli-ilman ekstinktio kolmena eri päivänä (15.01., 29.01. ja 05.03.), jolloin sääolosuhteet ovat olleet erilaisia. Kaikkina näinä päivinä ekstinktio lähti kasvamaan aamuruuhkan aikaan. Ekstinktio pysyi tasaisena läpi päivän, kunnes iltapäiväruuhkan aikaan ekstinktio lähti laskemaan. Suurimpia ekstinktioita havaittiin 15.1. ja 5.3. Selvästi pienempiä ekstinktioita oli havaittu 29.1. Tällöinkin ekstinktio muuttui liikenteen mukana, mutta se pysyi kuitenkin pienenä läpi päivän. Ekstinktion suuri vaihtelu päivien välillä johtui todennäköisesti erilaisista meteorologisista olosuhteista; 29.1. lämpötila oli lähellä nollaa ($-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja ilmassa oli paljon kosteutta (ilman suhteellinen kosteus oli 97 %). Toisina päivinä oli huomattavasti kylmempää (lämpötila oli 15.01 $-5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja 05.03. se oli $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja myös kuivempaa (ilman suhteellinen kosteus oli 15.01 82 % ja 05.03. se oli 88 %). Kuivemmalla ja kylmemmällä säällä ekstinktio vaikuttaisi siis olevan suurempi. Liikenne vaikuttaa ekstinktion tenehdeihin tunnelissa. Suuremmilla liikennemäärillä havaitaan suurempia ekstinktioita, mutta muut parametrit määrittävät, mille tasolle ekstinktio asettuu.



Kuva 22. a) Ekstinktio b) liikennemäärä B-tunnelissa kolmelle erilaiselle päivälle.

5.3.2 Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus tunneli-ilman ekstinktion

Kuvassa 23 on esitettyä tunneli-ilman ekstinktio tunnelin ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Kuvassa esitetty mittaustiedot on keskiarvoistettu niin, että yksi mittauspiste



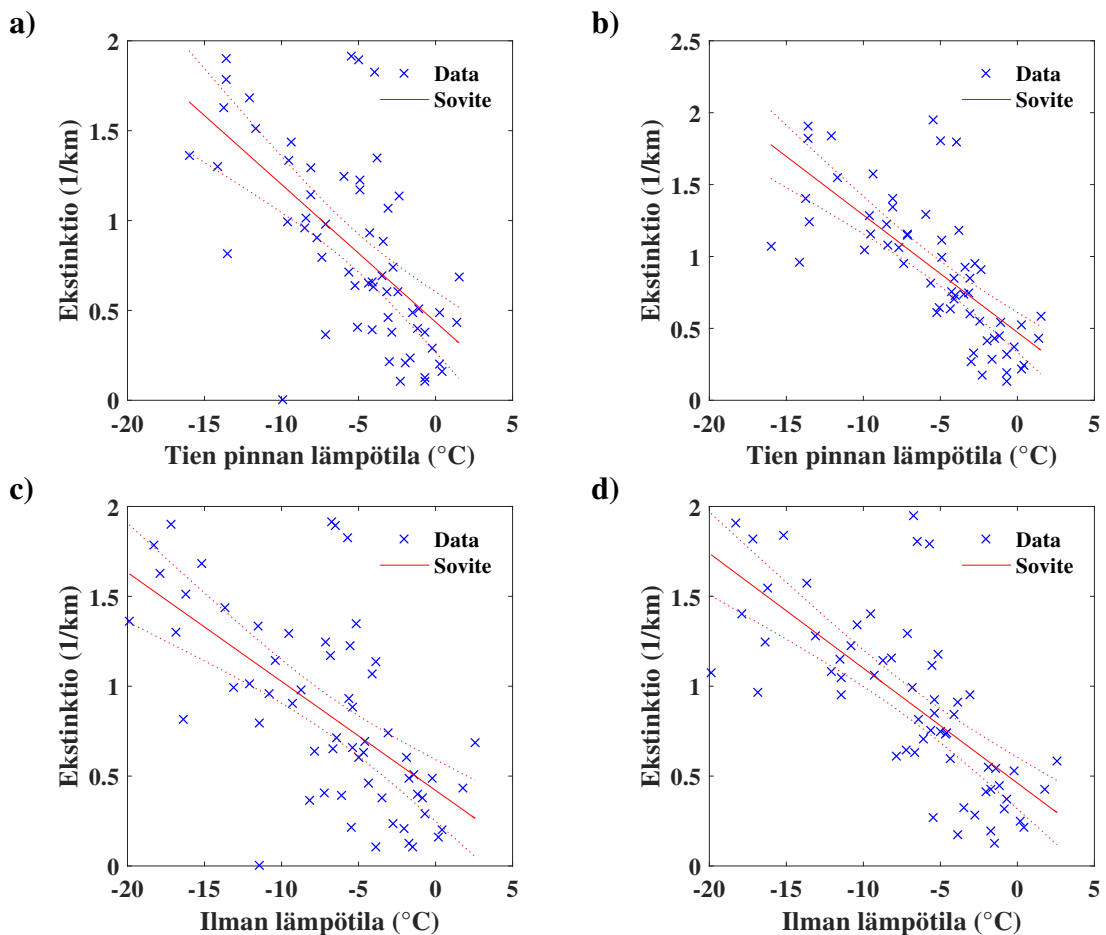
Kuva 23. Tunneli-ilman ekstinktio ilman suhteellisen kosteuden funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Kuvassa on myös sovite. Katkoviivat kuvaavat sovitteen virherajoja.

vastaa yhtä päivää ja vain arkipäivät on sisällytetty mukaan, sillä liikennemäärä yhden päivän keskiarvo on arkisin lähes vakio. Mittausdataan sovitettujen trendiviivojen perustella

kosteuden pienetessä ekstinktio kasvoi molemmissa tunneleissa. Tämä sopii hyvin yhteen silmämääräisesti tehtyjen havaintojen ja kirjallisuuden kanssa. Kuten jo kappaleessa 3.2 todettiin, tienpinnan ollessa kostea katupöly tarttuu tienpintaan eikä leviä ilmaan. Kuitenkaan kuvan 23 perustella tämä riippuvuus ei ollut täysin lineaarinen. Tähän voi vaikuttaa se, että nimenomaan tienpinnan kosteudella on merkitystä siihen, kuinka hyvin katupölyhiukkaset siitä irtoavat. Nyt kyseessä on tunnelin ilman suhteellisen kosteuden mittausta, jonka vaihtelu todennäköisesti poikkeaa jonkin verran tienpinnan kosteuden vaihtelusta. Valitettavasti tässä tutkimuksessa ei ollut saatavilla tietoa tienpinnan kosteudesta.

5.3.3 Lämpötilan vaikutus tunneli-ilman ekstinktion

Kuvassa 24 on kuvattuna tunneli-ilman ekstinktion vuorokausikeskiarvo ilman ja tien pinnan lämpötilan funktiona. Vain arkipäivät on tässäkin tapauksessa otettu huomioon. Erityisesti verrattuna aiemmin esitettyyn tunneli-ilman suhteellisen kosteuden ja mitat-

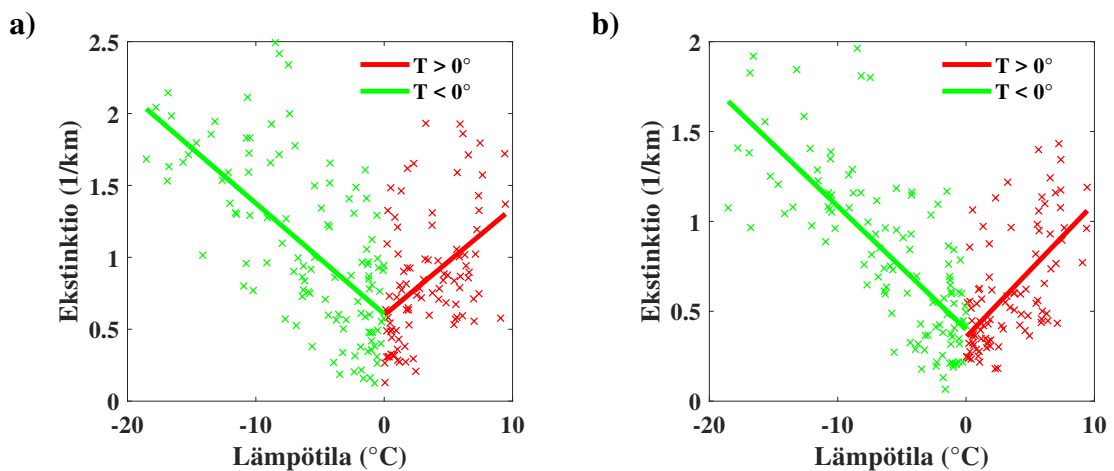


Kuva 24. Kuvassa on esitettyä ekstinktio tienpinnan lämpötilan funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa sekä ekstinktio ilman lämpötilan funktiona c) B-tunnelissa d) A-tunnelissa. Katkoviivat kuvaavat soviteen virherajoja.

tujen ekstinktioarvojen riippuvuuteen, riippuvuus oli tunnelin lämpötilan ja mitattujen ekstinktioarvojen välillä hyvin lineaarinen. Kuvasta voidaan havaita, että matalissa lämpö-

tiloissa ekstinktio sai suuria arvoja. Vaikka riippuvuus oli lineaarisempi kuin kosteuden tapauksessa, kuitenkin myös hajontaa mittausdatassa oli merkittävästi.

Käytettäessä Atalan tiesääaseman dataa pystytään tutkimaan, kuinka lämpötila on vaikuttanut tunnelin ekstinktioihin isommalla aikaskaalalla. Kuvan 5 perusteella todettiin, että Atalan lämpötila vastaa hyvin tunnelissa mitattuja lämpötiloja, joten Atalan dataa voidaan käyttää arvioimaan tunnelissa vallitsevaa ilman lämpötilaa. Kuvassa 25 on esitettyä tunnelissa mitatun ekstinktion vuorokausikeskiarvo Atalassa mitatun lämpötilan funktiona aikaväliltä 1.10.2017 - 01.05.2018. Kuvasta havaitaan, että lämpötilan vaikutus ekstinktion muuttui 0 °C :n lähettyvillä. Pakkasasteilla lämpötilan pienetessä ekstinktio kasvaa, mutta positiivisilla lämpötiloilla riippuvuus oli erilainen; kun lämpötila oli suurempi kuin 0 °C , tunneli-ilman ekstinktio kasvoi lämpötilan kasvaessa.



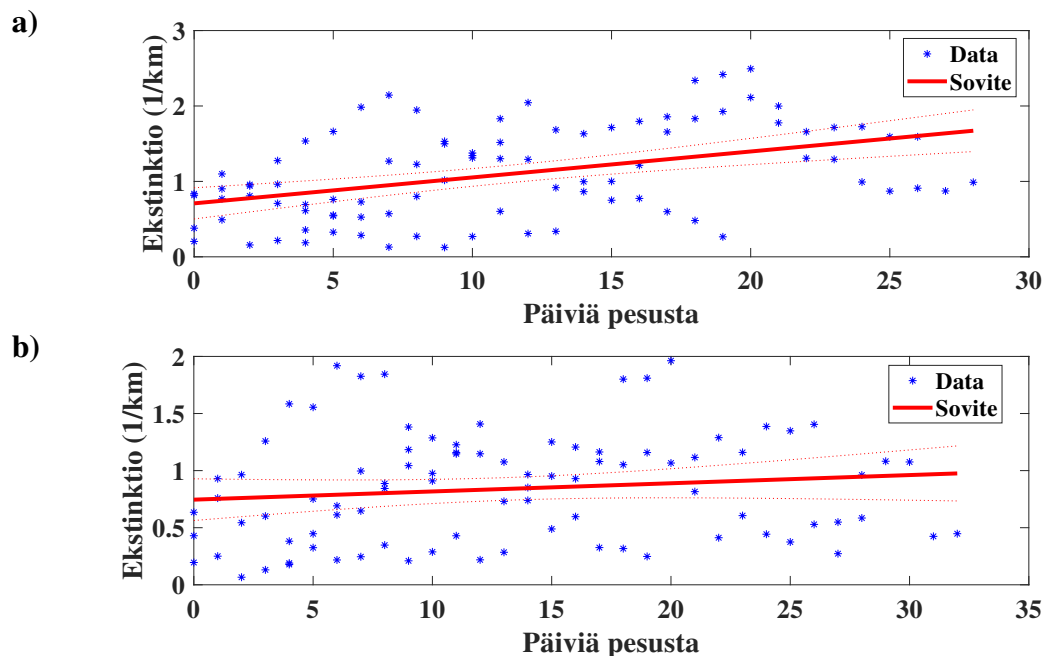
Kuva 25. Tunneli-ilman ekstinktio Atalassa mitatun ilman lämpötilan funktiona a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Kuvissa on eriteltyä yli 0 °C ja alle 0 °C asteen lämpötilat

Lämpötilan laskiessa tunneli-ilman ekstinktio siis kasvaa pakkasasteilla. Yhtenä mahdollisena selityksenä tähän ilmiöön voi olla se, että katupölyn määrä tunneli-ilmassa kasvaa hyvin kylmissä lämpötiloissa. Denby *et al.* (2013) kertoo, että katupölyn määrän pitäisi kuitenkin kasvaa lämpötilan kasvaessa, sillä tienpinta kuivuu tällöin nopeammin. Samanlaisia tuloksia sai (Berger & Denby 2011), jonka mittauksen mukaan kylmällä ajanjaksolla katupölyä oli vähän ilmassa. Denby *et al.* (2013) ja Berger & Denby (2011) mittaukset oli tehty kuitenkin huomattavasti lämpimimmissä olosuhteissa, kylmimmät lämpötilat noissa mittauksissa oli n. -5 °C , kun taas tässä työssä suoritettujen mittauksen aikana saavutettiin jopa -20 °C asteen pakkasia. Noissa mittauksissa havaittu ilmiö havaitaan myös kuvassa 24 positiivisilla lämpöasteilla, sillä ekstinktio (ja siten mahdollisesti myös katupölyn määrä) kasvaa lämpötilan noustessa. Mahdollisesti hyvin kylmissä olosuhteissa tienpinta on hyvin kuiva, jolloin katupölyn määrä tunneli-ilmassa kasvaa. Yhtenä mahdollisena selityksenä voi olla myös niin sanottu "jääsumu", jota muodostuisi tunneliin kylmissä olosuhteissa. Jääsumu koostuu jääkristalleista alle -20 °C :een lämpötiloissa ja tyypillisesti jääsumua muodostuu, kun kostea ja lämmin ilma viilenee tasaisessa paineessa (Gultepe *et al.* 2017). Tunnelissa vastaavanlaista jääsumua voi syntyä liikenteen pakokaasujen jäähtyessä kylmis-

sä olosuhteissa. Pakokaasussa olevat hiukkaset tai tunnelissa jo valmiiksi olevat hiukkaset voivat olla toimia tiivistymisytiminä. Lämpötilan laskiessa jääkristalleja voi muodostua immersio- tai kontaktijäätymisen kautta. Vaikka tyypillisesti jääkristalleja havaitaan vain alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:een lämpötiloissa, on mahdollista että tunnelissa jääkristalleja alkaa muodostua jo suuremmilla lämpötiloilla suurien liikenteen päästöjen takia.

5.3.4 Rantatunnelin pesun vaikutus tunneli-ilman ekstinktioon

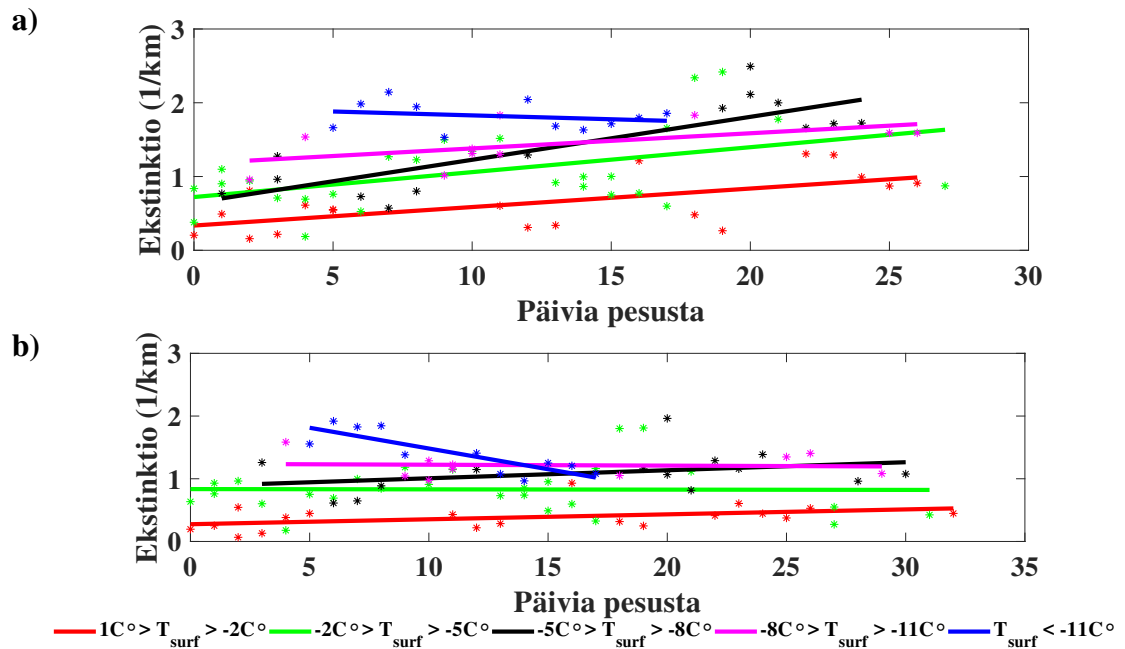
Tässä tutkimuksessa tutkittiin myös pesun vaikutusta tunnelissa vallitsevaan ekstinktioon. Tunnelia pestään säännöllisin väliajoin, millä pyritään vähentämään katupölyn määrää tunnelissa ja siten parantamaan tunneli-ilman näkyvyyttä. Kuvassa 26 on esitettyä A- ja B-tunneleissa mitattu ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona. Kuvassa on myös esitettyä sovite koko datalle. Molemmissa tunneleissa koko mittausdataan tehty



Kuva 26. a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa mitattu tunneli-ilman ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona. Kuvissa on esitettyä sovite koko datalle.

sovite on nouseva, jonka perusteella tunneli-ilman ekstinktio kasvoi sitä isommaksi, mitä pidempi aika on kulunut edellisestä pesusta. B-tunnelissa mitattuun dataan tehdyn sovitteen kulmakerroin on suurempi kuin A-tunnelissa. Kuvan perusteella datapisteet ovat kuitenkin hyvin hajallaan, eikä sovite vastaa datapisteitä erityisen hyvin.

Pesun lisäksi monet muutkin parametrit vaikuttavat tunnelissa vallitsevaan ekstinktioon. Tämän vuoksi pesun vaikutusta on lähdetty tutkimaan tarkemmin vielä lämpötilan vaikutuksen kautta, sillä sen havaittiin kuvan 24 perusteella vaikuttavan selvästi tunneli-ilman ekstinktioon. Tästä johtuen kuvassa 27 on esitettyä tunneli-ilman ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona niin, että kuvassa on datapisteiden lisäksi sovitteet

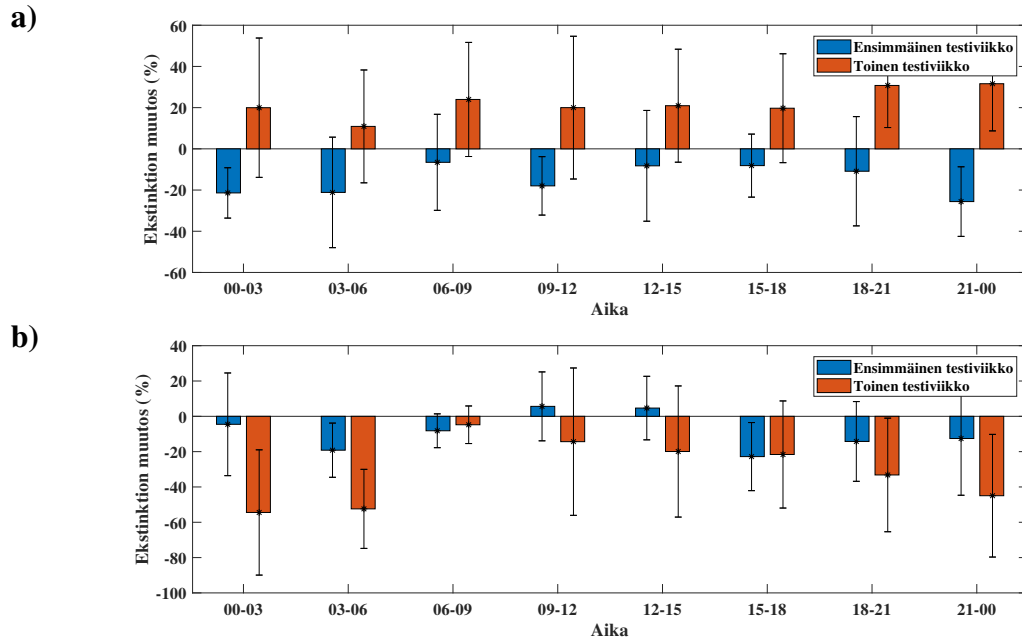


Kuva 27. a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa mitattu ekstinktio edellisestä pesusta kuluneiden päivien funktiona. Kuvissa on esitettyä sovitteet eri lämpötilaväleille.

eri lämpötilaväleille. Kuvan 27 perusteella mittausdatan hajoaminen selittyy osittain lämpötilan vaikutuksesta. Isoilla lämpötiloilla mitatut ekstinktiot olivat alempia kuin kylmillä lämpötiloilla, mikä siis havaittiin jo kuvan 24 yhteydessä. Kuvassa 27 sovitteet ovat pääosin nousevia myös eri lämpötilaväleille, lukuun ottamatta aivan pienimpiä lämpötiloja, jolloin sovite ei ollut nouseva. Tämä voi johtua siitä, että datapisteitä alle -11°C :n lämpötiloista on suhteellisen vähän verrattuna muihin lämpötilaväleihin. Vastaavasti kuin kuvassa 26 A-tunnelissa sovitteiden kulmakertoimet ovat pienempiä myös eri lämpötilaväleillä. Pesun suorittaminen vaikuttaisi pienentävän tunnelissa vallitsevaa ekstinktiota, kun tarkastellaan tarpeeksi pitkää aikaväliä. Vaikutus on kuitenkin vähäinen ja meteorologisilla parametreilla on selkeästi pesua suurempi vaikutus ekstinktion.

5.3.5 Rantatunnelin tuuletuksen vaikutus ekstinktion

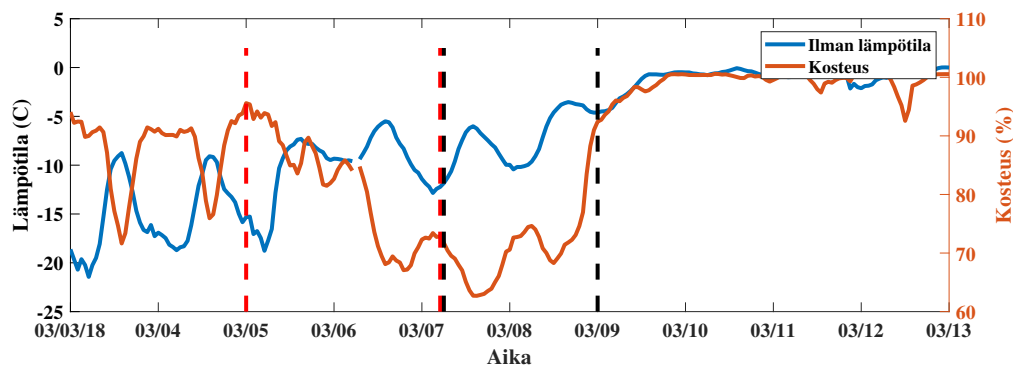
Tuuletuksen vaikutusta Rantatunnelissa vallitsevaan näkyvyyteen tutkittiin pitkäaikaistuu-letustestien avulla (taulukko 2). Testejä tehtiin kahden viikon ajan ja siten, että molemmilla viikoilla suoritettiin identtiset testit. Aina testien alussa tuuletus oli vakiona kaksi päivää. Tämän jälkeen tuuletuksen tehoa kasvatettiin ja pidettiin vakiona taas kaksi päivää. Kuvassa 28 on esitettyinä näiden testien tuloksia. Kummankin testiviikon pienemmän tuuletuksen aikana mitattuja ekstinktiota vertailtiin suuremman tuuletuksen aikana mitattuihin ekstinktioihin. Tämän vertailun pohjalta laskettiin ekstinktion muutos. Kuvissa on esitettyä tämä ekstinktion muutos. Prosenttiarvojen ollessa positiivisia ekstinktio oli tuuletuksen tehostamisen yhteydessä kasvanut. Prosenttien ollessa negatiivisia ekstinktio oli tuuletuksen tehostamisen yhteydessä pienentynyt.



Kuva 28. Ekstinktion muutos eri kellonaikoina tuuletuksen tehostuessa a) B-tunnelissa b) A-tunnelissa. Prosenttien ollessa positiivisia ekstinktio oli kasvanut, kun tuuletuksa tehostettiin ja prosenttien ollessa negatiivisia ekstinktio oli pienentynyt, kun tuuletuksa tehostettiin.

A-tunnelissa ensimmäisellä testiviikolla tuuletuksen tehostaminen oli pienentänyt tunneli-ilman ekstinktiota noin 5 % - 30 %. Vaikutus oli pienimmillään päivällä ja isoimmillaan illalla ja yöllä. Toisella testiviikolla A-tunnelissa ekstinktio oli suurimmassa osassa tapauksia pienentynyt noin 0 %-40 % tuuletuksen tehostuessa. Vaikutus oli pienimmillään päivällä sekä suurin illalla ja yöllä. B-tunnelissa ensimmäisellä testiviikolla tuuletuksen tehostaminen oli pienentänyt ekstinktiota noin 5 %-20 %, vaikutuksen ollessa suurimmillaan yöllä. Päivällä eli suuren liikennemäärän aikaan tuuletuksen vaikutus ekstinktion oli pienempi. Kuitenkin B-tunnelissa toisella testiviikolla havaitaan päinvastainen vaikutus, sillä tuuletuksen tehostamisen jälkeen ekstinktio oli kasvanut noin 10 % - 30 %. Tämä johtuu todennäköisesti sääolosuhteiden muuttumisesta jälkimmäisen testiviikon tuuletestien aikana. Kuvassa 29 on esitettyä 03.03. – 13.03. välisenä ajanjaksona (vain toisen testiviikon ajanjakso on kuvattuna) vallinnut suhteellinen kosteus sekä ilman lämpötila. Kuvassa 29 on merkittynä punaisella katkoviivalla aikaväli, jolloin tuuletus oli ollut pienempi, ja mustalla katkoviivalla aikaväli, jolloin tuuletus oli ollut suurempi.

Kuvasta 29 nähdään, että tunneli-ilman suhteellinen kosteus on alkanut laskea tuuletestien aikana ja tuuletuksen ollessa kovemmalla teholla (mustat katkoviivat) kosteus onkin ollut hyvin matala. Pieni kosteus kasvattaa ekstinktion arvoja (kuva 12), josta seuraa todennäköisesti myös tämän jakson suuremmat ekstinktion arvot. Tämä pystyy ainakin osittain selittämään miksi kuvassa 28 B-tunnelissa on havaittu, että ekstinktio on kasvanut tuuletuksen tehostamisen jälkeen. Tulokset viittaavat siten siihen, että tuuletuksen tehostamisella pystytään pienentämään ekstinktion arvoja noin 10 %-30 %. Kuitenkin meteorologisten parametrien vaikutus tunneli-ilman ekstinktion on suurempi kuin tuuletuksen teho.



Kuva 29. Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden aikasarja aikaväliltä 03.03.-13.03. Kuvassa on esitetty toisen viikon tuuletustestit, viikon ensimmäinen tuuletustesti punaisella katkoviivalla ja viikon jälkimmäinen mustalla katkoviivalla.

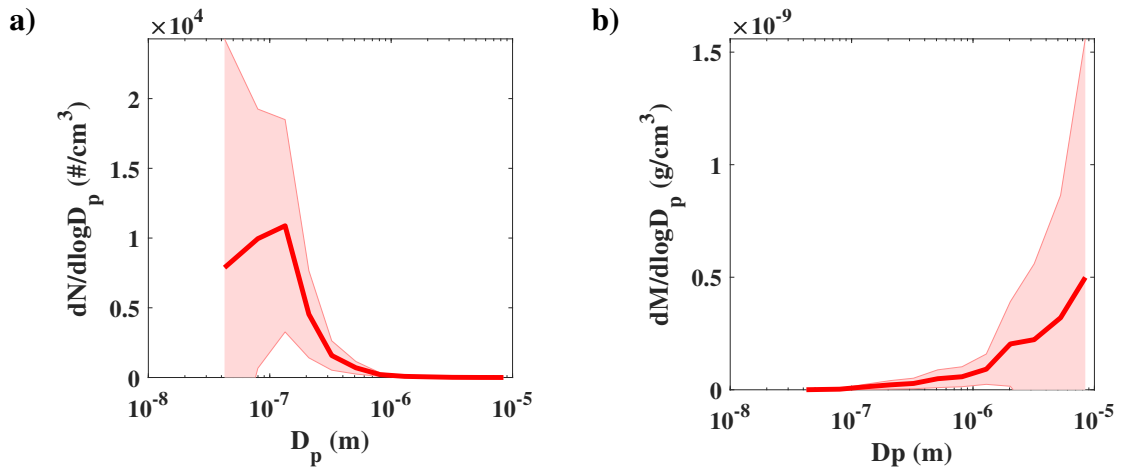
Myös mobiililaboratoriomittausten aikana suoritettiin testejä siirtoilmapuhaltimilla (taulukko 5). Nämä testit olivat kuitenkin liian lyhyitä, jotta niistä saataisiin luotettavaa tietoa tuuletuksen vaikutuksesta tunneli-ilman ekstinktion. Tuuletuksen vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion ei voitu todentamaan luotettavasti, sillä lyhyen testijakson takia muut parametrien (kuten liikenteen vaihtelu sekä muuttuvat sääolosuhteet) vaikuttivat liikaa tuloksiin.

5.4 Tulosten keskihajonnasta

Edellisessä kappaleissa tulokset on usein esitettyinä keskiarvoina joltakin aikaväliltä. Keskiarvoa laskettaessa syntyy keskihajontaa, johon tässä kappaleessa keskitytään. Keskihajonta kuvaa keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta. Usein ilmakehämittauksissa olosuhteet voivat vaihdella hyvinkin nopeasti, eikä olosuhteita pystytä hallitsemaan täysin. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus on vaihdellut hyvin paljon mittausten aikana. Tällöin voi syntyä paljon vaihtelua mittaustuloksiin. On siis odotettavaa, että tässä tutkimuksessa esitetyillä keskiarvoilla on myös paljon keskihajontaa.

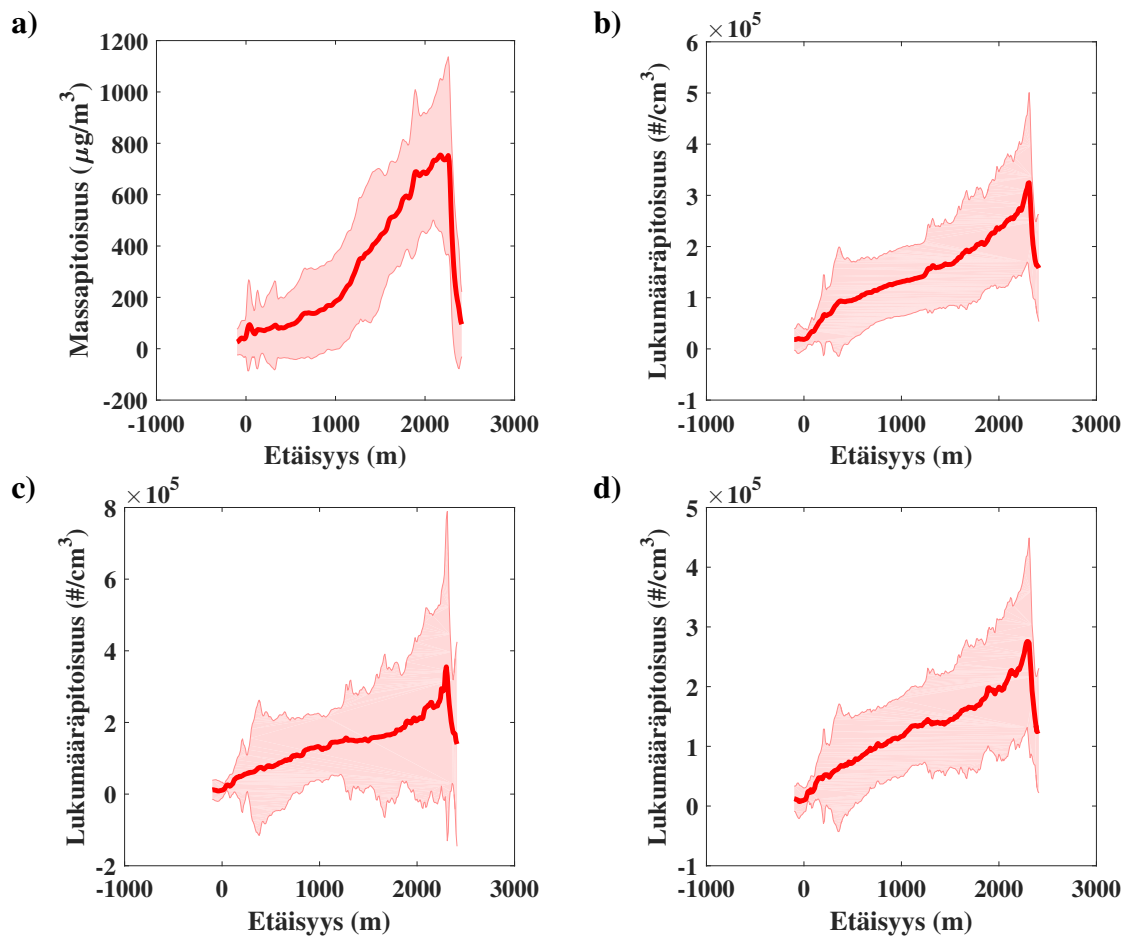
Kuvassa 30 on esitettyinä pitkäaikaismittauksissa käytetyn ELPI:n mittaamat hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakaumat virherajoineen ELPI:n ollessa poistokammiossa. Suurta keskihajontaa on hiukkasten lukumääräkokojakaumissa pienillä hiukkasilla ja hiukkasten massakokojakaumassa isoilla hiukkasilla. Koska tässä esitetty data on keskiarvo pitkältä aikaväliltä, siihen sisältyy paljon erilaisia sääolosuhteita ja vuorokaudenaikoja. Näiden erilaisten olosuhteiden takia keskihajonta kasvaa. Tämä näkyy varsinkin suurissa ja pienissä hiukkaskoissa. Suurin osa keskihajonnasta on todennäköisin peräisin vaihtuvista olosuhteista eikä mittalaitteen aiheuttamasta virheestä. Kuvassa 30 keskihajonta näyttää menevän myös negatiivisen puolelle. ELPI ei kuitenkaan mittaa negatiivisia lukumääriä tai massakokojakaumia, vaan se johtuu keskiarvon esitystavasta kuvaajassa.

Kuvassa 31 on esitettyinä mobiililaboratoriomittauksissa käytettyjen hiukkasmittalaitteiden mittaamat hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta päivämittauksissa 21.2. B-tunnelissa. Hajontaa on kaikissa tapauksissa, mutta keskihajonta pysyy



Kuva 30. ELPI:n mittaama hiukkasten a) lukumääräkokojakauma b) massakokojakauma keskihajontoineen. Data on mitattu aikavälillä 14.2.-8.3.

suhteellisen tasaisena koko tunnelin ajan. Hajonta johtuu todennäköisesti paikallisista päästöistä, esimerkiksi ohi ajavista autoista, joiden päästöt vaikuttavat hetkellisesti tuloksiin. Mittaukset kestivät myös useamman tunnin, jonka aikana liikennemäärä, lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus on voinut muuttua. Liitteessä A löytyy vastaavat kuvat mobiililaboratoriomittauksissa mitatuille NO_x :lle, CO_2 :lle ja mustalle hiilelle. Keskihajontaa on jokaisessa tapauksessa, mutta tämä on todennäköisesti muuttuvista olosuhteista johtuvaa.



Kuva 31. a) ELPI:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta b) ELPI:n mittaama tunneli-ilman massapitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta c) PSM:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta d) CPC:n mittaama tunneli-ilman hiukkaspitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta mobiililaboratoriomittauksissa päivällä 21.2. B-tunnelissa.

6. YHTEENVETO

Tampereen Rantatunnelissa on havaittu talviaikaan näkyvyysongelmia. Tämän työn tarkoituksena oli tutkia Tampereen Rantatunnelissa esiintyvän aerosolin hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksia, hiukkaskokojakaumia ja optisia ominaisuuksia ja selvittää, kuinka erilaiset parametrit vaikuttavat tunneli-ilman ekstinktiioon ja näkyvyyteen. Mittauksia tehtiin alkuvuodesta 2018, jolloin ELPI mittasi hiukkasten lukumääräkokojaumaa tunnelissa 8.1.-8.3. välisen ajan. Näiden mittausten lisäksi suoritettiin mobiililaboratoriomittauksia, jolloin tunnelissa ajettiin TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratoriolla samalla mitaten tunneli-ilmaa usealla eri mittalaitteella. Käytössä oli myös Rantatunnelissa kiinteästi oleva mittaustilaiteisto, joka antoi tietoa tunnelissa vallitsevasta ekstinktiosta, ilman virtauksen nopeudesta, NO_2 :n ja CO :n pitoisuuksista, tienpinnan ja tunneli-ilman lämpötilasta sekä ilman suhteellisesta kosteudesta.

Tutkimalla ELPI:n mittaamaa hiukkasten lukumääräjakaumaa havaittiin, että tunnelissa on paljon isoja (noin $10\ \mu m$:n kokoisia) hiukkasia ja todennäköisesti myös tätä isompia hiukkasia. Myös pieniä alle $2.5\ \mu m$:n kokoisia hiukkasia havaittiin runsaasti, jotka ovat todennäköisesti peräisin autojen pakokaasupäästöistä. Hiukkasten lukumääräpitoisuus ja massapitoisuus painottuivat tunnelin loppua kohti, kun tunnelissa vallitseva ilmavirtaus ohjaa hiukkasia kohti tunnelin loppua. Hiukkasten lukumääräpitoisuus oli maksimissaan $2.7 \cdot 10^5\ \#/cm^3$ ja massapitoisuus $1500\ \mu g/m^3$. Myös suurimmat CO_2 ja NO_x pitoisuudet havaittiin tunnelin loppupäässä.

ELPI:n mittaamista hiukkasten lukumääräkokojaumista laskettiin lisäksi teoreettinen ekstinktio. Vertaamalla teoreettista ekstinktiota Rantatunnelin sensorien mittaamiin ekstinktioihin arvoihin, havaittiin teoreettisesti lasketulla ja mitatulla ekstinktiolla olevan suuri ero. Tarkastelemalla eri komponenttien vaikutusta kokonaisekstinktiioon havaittiin, että yli $10\ \mu m$:n kokoisilla hiukkasilla on suuri merkitys kokonaisekstinktiioon. Nämä yli $10\ \mu m$:n kokoiset hiukkaset ovat todennäköisesti katupölyä, jota havaittiin jo hiukkasten massapitoisuuksien ja massakokojakaumien yhteydessä. Katupölyllä on siis suuri merkitys tunnelissa vallitsevaan ekstinktiioon.

Mobiililaboratoriomittauksissa tunneli-ilmaa mitattiin myös etalometrillä, joka mittaa optisesti absorboivan mustan hiilen pitoisuutta. Öisin tunnelissa BC-pitoisuus pysyi hyvin tasaisena, mutta päivisin se kasvoi hyvin vahvasti tunnelin loppua kohti todennäköisesti suuremman liikennemäärän takia. BC-pitoisuus oli jopa yli $7000\ ng/m^3$, joka on hyvin suuri verrattuna muihin talviaikaan Suomessa tehtyihin BC-mittauksiin. Etalometrin mittaamasta datasta pystyttiin laskemaan absorption osuus kokonaisekstinktiosta. Tällöin havaittiin, että absorption osuus kokonaisekstinktiosta oli hyvin pieni tunnelin loppupäässä. Kuitenkin absorption osuus kokonaisekstinktiosta tunnelin alussa oli merkittävä. Tunnelin

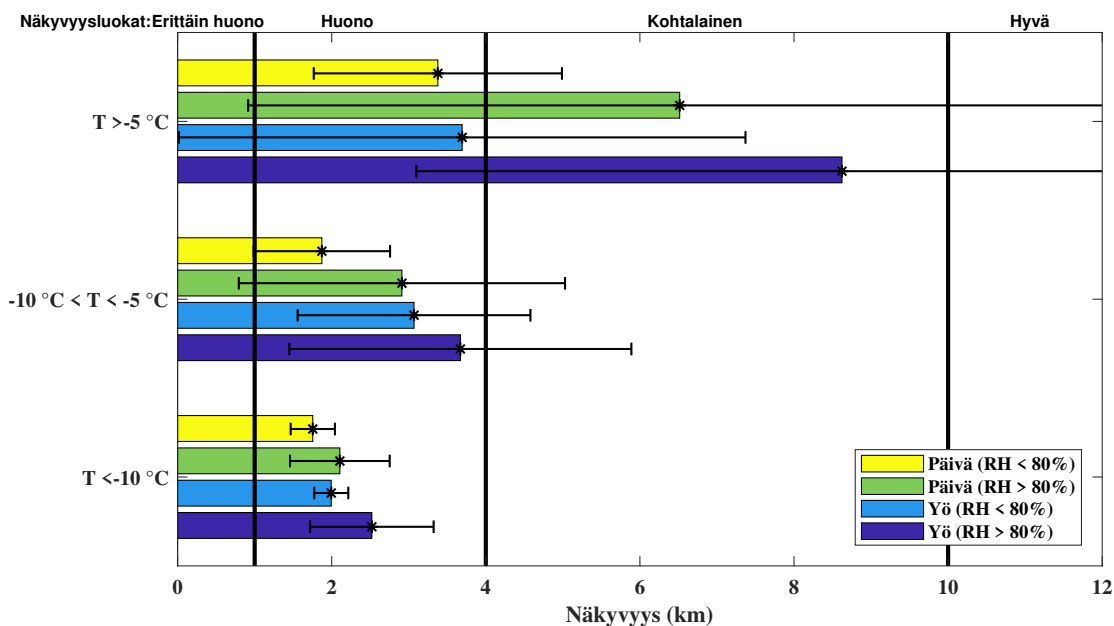
lopussa kokonaisekstinktion vaikuttaa hyvin voimakkaasti katupöly (ja mahdollisesti myös jonkinlainen jääsumu), joka todennäköisesti sirottaa valoa voimakkaasti. Tunnelin alussa ei kuitenkaan ole niin paljon katupölyä, vaan siellä myös liikenteen päästöillä on todennäköisesti suurempi vaikutus kokonaisekstinktion. Liikenteen päästöissä on tyypillisesti paljon absorboivia hiukkasia, joka selittäisi miksi absorption vaikutus on suurempi tunnelin alkupäässä. Tutkimalla alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten optisia ominaisuuksia (jotka ovat pääsääntöisesti liikenteen päästöistä peräisin olevia hiukkasia) havaittiin, että tässä hiukkaskokoluokassa absorptiolla oli noin 50%:n vaikutus kokonaisekstinktion, joka oli samaa luokkaa muihin tunnelissa tehtyihin ekstinktiomittauksiin verrattuna.

Myös eri parametrien vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion tarkasteltiin. Havaittiin, että kuivalla ja kylmällä säällä ekstinktio oli suurimmillaan. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa suuri katupöly ei leviä ilmaan yhtä tehokkaasti kuin kuivissa olosuhteissa. Myös tunneli-ilman lämpötilalla havaittiin olevan suuri vaikutus tunnelissa vallitsevaan ekstinktion. Yli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n asteen lämpötiloilla ekstinktio kasvoi lämpötilan kasvaessa. Kirjallisuuden mukaan katupölyn määrän ilmassa kasvaa lämpötilan kasvaessa, joka voi selittää miksi lämpötilan kasvaessa myös ekstinktio kasvoi yli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n asteen lämpötiloilla. Kuitenkin alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n asteen lämpötiloilla ekstinktio kasvoi lämpötilan laskiessa. Ekstinktion käyttäytymiseen alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n asteen lämpötiloissa ei löydetty lopullista selitystä. Mahdollisia selityksiä on katupölyä määrän kasvaminen hyvin kylmissä olosuhteissa tai jääsumun muodostuminen tunneli-ilmaan liikenteen pakokaasujen jäähtyessä.

Meteorologisten parametrien lisäksi myös tunnelin pesemisellä havaittiin olevan pieni vaikutus tunnelissa vallitsevaan ekstinktion. Mitä pidemmälle edellisestä tunnelin pesusta mentiin, sitä suuremmaksi ekstinktio nousi. Kuitenkin vaikutus oli pienehkö, meteorologisilla parametreilla oli suurempi vaikutus. Myös tunnelin tuuletuksella havaittiin olevan vaikutusta tunneli-ilman ekstinktion. Kun kaikki tunnelin alusta puoleenväliin olevat siirtoilmapuhaltimet laitettiin päälle, ja tunnelin lopussa olevien siirtoilmapuhaltimien tehoa kasvatettiin 50 %:sta 70 %:iin, ekstinktio oli pienentynyt 5 % - 40 %, öisin enemmän ja päivisin vähemmän. Kuitenkin tässäkin tarkastelussa havaittiin, että kosteuden ja lämpötilan muutos vaikutti voimakkaammin ekstinktion kuin tuuletuksen tehostaminen. Tunnelin tuuletuksella voitiin kuitenkin vaikuttaa tunneli-ilman ekstinktion.

Tämän työn keskiössä on ollut monessa tapauksessa ekstinktio. Kuitenkin tunnelissa vallitseva näkyvyys antaa kuvaavamman kuvan tunnelissa vallitsevista olosuhteista. Kuvassa 32 on esitettyä tunnelin näkyvyys eri kategorioihin luokiteltuna. Näkyvyys on laskettuna B-tunnelin sensorin mittaamasta ekstinktiosta aikaväliltä 1.1.-4.4.2018 kaavan 2.3.9 mukaan. Näkyvydet on luokiteltu kolmeen eri ryhmään lämpötilan perusteella: alle $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen lämpötilat, lämpötilat $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen ja $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen välissä ja yli $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen lämpötilat. Jokaisella lämpötila-alueella datapisteet ovat luokiteltu neljään eri kategoriaan. Nämä kategoriat ovat: yöolosuhteet (18:00-06:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80 %, yöolosuhteet ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80%, päiväolosuhteet (06:00-18:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80 % ja päiväolosuhteet ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80%, Pystyviivat kuvastavat näkyvyysluokkia (alle 1 km erittäin huono,

1-4 km huono, 4-10 km kohtalainen, yli 10 km hyvä). Keskiarvoisesti huonoin näkyvyys



Kuva 32. B-tunnelin näkyvyys aikaväliltä 1.1.-4.4.2018. Pylväät on luokiteltu kolmeen ryhmään lämpötilan mukaan: alle -10 °C asteen lämpötilat, lämpötilat -10 °C asteen ja -5 °C asteen välissä ja yli -5 °C asteen lämpötilat. Jokaisessa lämpötilaluokassa on pylväät yöolosuhteille (18:00-06:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80%, yöolosuhteille ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80%, päiväolosuhteille (06:00-18:00) ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80% ja päiväolosuhteille ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80%. Vertikaaliset pystyviivat kuvastavat eri näkyvyysluokkia (alle 1 km erittäin huono, 1-4 km huono, 4-10 km kohtalainen, yli 10 km hyvä).

on havaittu päiväolosuhteissa kosteuden ollessa alle 80%:a (1.9 km) ja paras näkyvyys on vastaavasti havaittu yöolosuhteissa kosteuden ollessa yli 80%:a (8.1 km). Nämä vastaavat hyvin edellisissä kappaleissa esitettyjä tuloksia. Lämpötilan laskiessa keskiarvoiset näkyvyydet pääasiassa pienenevät. Huonoimmat näkyvyydet on havaittu juuri alle -10 °C asteen lämpötiloissa ja parhaimmat näkyvyydet yli -5 °C asteen lämpötiloissa. Myös kosteudella on selvä vaikutus näkyvyyteen. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80 %:a, keskiarvoiset näkyvyydet ovat suurempia kuin ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80 %:a. Kellonajalla on myös selvä vaikutus keskiarvoiseen näkyvyyteen johtuen todennäköisesti päivisin kasvavasta liikennemäärästä. Koko mittausjakson aikana keskiarvoinen näkyvyys tunnelissa on pääsääntöisesti ollut huono. Parhaimmillaankin keskiarvoinen näkyvyys on ollut vain kohtalaista (noin 8 km), kuitenkin suurimmassa osassa tapauksia näkyvyys on ollut huonoa. Tunnelissa on siis selvästi näkyvyysongelmia.

Jatkotutkimusten kannalta olisi tärkeää mitata tunnelin tienpinnan kosteus, koska se on tärkeä parametri katupölyn irtoamiseen tienpinnasta. Tämä tieto auttaisi selvittämään olosuhteita, jolloin katupölyä muodostuu paljon ja saattaisi antaa lisätietoa siitä, miksi lämpötila vaikuttaa niin paljon tunneli-ilman ekstinktion.

LÄHTEET

Abu-Allaban, M., Gillies, J., Gertler, A., Clayton, R. & Proffitt, D. (2003). Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles. *Atmospheric Environment*, vsk. 37, s. 5283–5293.

Almeida-Silva, M., Canha, N., Freitas, M., MDung, H. & Dionísio, I. (2011). Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal—an INAA study. *Applied Radiation and Isotopes*, vsk. 69(11), s. 1586–1591.

Berger, J. & Denby, B. (2011). A generalised model for traffic induced road dust emissions. Model description and evaluation. *Atmospheric Environment*, vsk. 45(22), s. 3692 – 3703.

Bohren, C. & Huffman, D. (1998). *Absorbition and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley.

Bond, T. C. & Bergstrom, R. W. (2006). Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review. *Aerosol Science and Technology*, vsk. 40(1), s. 27–67.

Brito, J., Rizzo, L. V., Herckes, P., Vasconcellos, P. C., Caumo, S. E. S., Fornaro, A., Ynoue, R. Y., Artaxo, P. & Andrade, M. F. (2013). Physical–chemical characterisation of the particulate matter inside two road tunnels in the São Paulo Metropolitan Area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 13(24), s. 12199–12213.

Chen, F., Hu, W. & Zhong, Q. (2013). Emissions of particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Fu Gui-shan Tunnel of Nanjing, China. *Atmospheric Research*, vsk. 124, s. 53 – 60.

Cheng, Y. S. (2005). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

Denby, B., Sundvor, I., Johansson, C., Pirjola, L., Ketzler, M., Norman, M., Kupiainen, K., Gustafsson, M., Blomqvist, G. & Omstedt, G. (2013). A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). Part 1: Road dust loading and suspension modelling. *Atmospheric Environment*, vsk. 77, s. 283 – 300.

Deng, X., Tie, X., Wu, D., Zhou, X., Bi, X., Tan, H., Li, F. & Jiang, C. (2008). Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China. *Atmospheric Environment*, vsk. 42(7), s. 1424 – 1435.

- Ebert, M., Weinbruch, S., Hoffmann, P. & Ortner, H. M. (2004). The chemical composition and complex refractive index of rural and urban influenced aerosols determined by individual particle analysis. *Atmospheric Environment*, vsk. 38(38), Contains Special Issue section on Measuring the composition of Particulate Matter in the EU, s. 6531 – 6545.
- El-Fadel, M. & Hashisho, Z. (2001). Vehicular emissions in roadway tunnels: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vsk. 31(2), s. 125.
- Gao, Y., Lai, S., Lee, S. C., Yau, P. S., Huang, Y., Cheng, Y., Wang, T., Xu, Z., Yuan, C. & Zhang, Y. (2015). Optical properties of size-resolved particles at a Hong Kong urban site during winter. *Atmospheric Research*, vsk. 155, s. 1 – 12.
- Garcia, L., Castro, T., Saveedra, M. & Martinez-Arroy, M. (2010). Optical properties of aerosols; southern Mexico City. *Atmosfera* 23, 2010(403-408).
- Gebhart, J. (2005). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. A John Wiley & Sons, Inc.
- Geller, M. D., Sardar, S. B., Phuleria, H., Fine, P. M. & Sioutas, C. (2005). Measurements of Particle Number and Mass Concentrations and Size Distributions in a Tunnel Environment. *Environmental Science & Technology*, vsk. 39(22), s. 8653–8663.
- Grieshop, A. P., Lipsky, E. M., Pekney, N. J., Takahama, S. & Robinson, A. L. (2006). Fine particle emission factors from vehicles in a highway tunnel: Effects of fleet composition and season. *Atmospheric Environment*, vsk. 40, Particulate Matter Supersites Program and Related Studies, s. 287 – 298.
- Griffing, G. (1980). Relations between the prevailing visibility, nephelometer scattering coefficient and sunphotometer turbidity coefficient. *Atmospheric Environment* (1967), vsk. 14(5), s. 577–584.
- Gultepe, I., Heymsfield, A. J., Gallagher, M., Ickes, L. & Baumgardner, D. (2017). Ice Fog: The Current State of Knowledge and Future Challenges. *Meteorological Monographs*, vsk. 58, s. 4.1–4.24.
- Hansen, A. (2005). The Aethalometer model AE-16. Instrument manual.
- Helin, A., Niemi, J. V., Virkkula, A., Pirjola, L., Teinilä, K., Backman, J., Aurela, M., Saarikoski, S., Rönkkö, T., Asmi, E. & Timonen, H. (2018). Characteristics and source apportionment of black carbon in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Atmospheric Environment*, vsk. 190, s. 87 – 98.
- Hinds, W. C. (1982). *Aerosol Technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons.
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Jankowiak, F. L. I. & Smirnov, A. (1998). AERONET—A

Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. Remote Sensing of Environment, vsk. 66(1), s. 1–16.

Hoosmuller, H., Chakrabarty, R. & Arnott, W. (2009). Aerosol light absorption and its measurement: A review. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, vsk. 110, s. 844–878.

Horvath, H. (1993). Atmospheric light absorption—A review. Atmospheric Environment, vsk. 27(3), s. 293–317.

Horvath, H. (1967). On the applicability of the Koschmieder visibility formula. Atmospheric Environment, vsk. 5(3), s. 177–184.

Hussein, T., Johansson, C., Karlsson, H. & Hansson, H. C. (2008). Factors affecting non-tailpipe aerosol particle emissions from paved roads: On-road measurements in Stockholm, Sweden. Atmospheric Environment, vsk. 42(4), s. 688 – 702.

Hyslop, N. P. (2009). Impaired visibility: the air pollution people see. Atmospheric Environment, vsk. 43(1), s. 182–195.

Imhof, D., Weingartner, E., Prévôt, A. S. H., Ordóñez, C., Kurténbach, R., Wiesen, P., Rodler, J., Sturm, P., McCrae, I., Ekström, M. & Baltensperger, U. (2006). Aerosol and NO_x emission factors and submicron particle number size distributions in two road tunnels with different traffic regimes. Atmospheric Chemistry and Physics, vsk. 6(8), s. 2215–2230.

Johansson, C., Norman, M. & Gidhagen, L. (2007). Spatial & temporal variations of PM₁₀ and particle number concentrations in urban air. Vsk. 127, s. 477–87.

Kanakidou, M., Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., Barnes, I., Dentener, F. J., Facchini, M. C., Van Dingenen, R., Ervens, B., Nenes, A., Nielsen, C. J., Swietlicki, E., Putaud, J. P., Balkanski, Y., Fuzzi, S., Horth, J., Moortgat, G. K., Winterhalter, R., Myhre, C. E. L., Tsigaridis, K., Vignati, E., Stephanou, E. G. & Wilson, J. (2005). Organic aerosol and global climate modelling: a review. Atmospheric Chemistry and Physics, vsk. 5(4), s. 1053–1123.

Karanasiou, A., Moreno, T., Amato, F., Tobías, A., Boldo, E., Linares, C., Lumbreras, J., Borge, R., Alastuey, A. & Querol, X. (2012). Variation of PM_{2.5} concentrations in relation to street washing activities. Atmospheric Environment, vsk. 54, s. 465–469.

Kaufman, Y. J., Setzer, A., Ward, D., Tanre, D., Holben, B. N., Menzel, P., Pereira, M. C. & Rasmussen, R. (1992). Biomass burning airborne and spaceborne experiment in the Amazonas. Journal of Geophysical Research, vsk. 97, s. 14581–14599.

Keskinen, J., Pietarinen, K. & Lehtimäki, M. (1992). Electrical low pressure impactor. Journal of Aerosol Science, vsk. 23(4), s. 353–360.

- Kittelson, D. B. (1998). Engines and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science*, vsk. 29(5), s. 575 – 588.
- Kokhanovsky, A. (2008). *Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*. Praxis Publishing.
- Kupiainen, K. & Tervahattu, H. (2004). The Effect of Traction Sanding on Urban Suspended Particles in Finland. *Environmental Monitoring and Assessment*, vsk. 93, s. 287–300.
- Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M. & Hillamo, R. (2015). Size and composition of airborne particles from pavement wear, tires, and traction sanding. *Environmental Science Technology*, vsk. 39, s. 699 – 706.
- Maricq, M. M. (2006). On the electrical charge of motor vehicle exhaust particles. *Journal of Aerosol Science*, vsk. 37(7), s. 858 – 874.
- Mårtensson, E. M., Nilsson, E. D., Buzorius, G. & Johansson, C. (2006). Eddy covariance measurements and parameterisation of traffic related particle emissions in an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 6(3), s. 769–785.
- Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Ann. Phys.*, vsk. 330, s. 337–445.
- Mätzler, C. (2002). *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption*. Institut für Angewandte Physik, Research Report 2002-08.
- Norman, M. & Johansson, C. (2006). Studies of some measures to reduce road dust emissions from paved roads in Scandinavia. *Atmospheric Environment*, vsk. 40(32), s. 6154 – 6164.
- Omstedt, G., Bringfelt, B. & Johansson, C. (2005). A model for vehicle-induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads. *Atmospheric Environment*, vsk. 39, s. 6088–6097.
- Pakkanen, T., Mäkelä, T., Hillamo, R., Virtanen, A., Rönkkö, T., Keskinen, J., Pirjola, L., Parviainen, H., Hussein, T. & Hameri, K. (2006). Monitoring of black carbon and size-segregated particle number concentrations at 9-m and 65-m distances from a major road in Helsinki. *Boreal Environment Research*, vsk. 11, s. 295–309.
- Pant, P. & Harrison, R. M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, vsk. 77, s. 78 – 97.
- Pitchford, M., Malm, W., Schichtel, B., Kumar, N., Lowenthal, D. & Hand, J. (2007). Revised Algorithm for Estimating Light Extinction from IMPROVE Particle Speciation Data. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vsk. 57(11), s. 1326–1336.

- Platt, U. (1994). Differential optical absorption spectroscopy (DOAS). *Chem. Anal. Series*, vsk. 127, s. 27 – 83.
- Pohjola, M. A., Kousa, A., Kukkonen, J., Härkönen, J., Karppinen, A., Aarnio, P. & Koskentalo, T. (2002). The Spatial and Temporal Variation of Measured Urban PM₁₀ and PM_{2.5} in the Helsinki Metropolitan Area. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, vsk. 2(5), s. 189–201.
- Pöschl, U. (2005). *Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects*. *Angewandte Chemie International Edition*, vsk. 44(46), s. 7520–7540.
- Robert, M. A., Kleeman, M. J. & Jakober, C. A. (2007). Size and Composition Distributions of Particulate Matter Emissions: Part 2—Heavy-Duty Diesel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vsk. 57(12), s. 1429–1438.
- Russell, P. B., Bergstrom, R. W., Shinozuka, Y., Clarke, A. D., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., Livingston, J. M., Redemann, J., Dubovik, O. & Strawa, A. (2010). Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 10(3), s. 1155–1169.
- Rönkkö, T., Kuuluvainen, H., Karjalainen, P., Keskinen, J., Hillamo, R., Niemi, J. V., Pirjola, L., Timonen, H. J., Saarikoski, S., Saukko, E., Järvinen, A., Silvennoinen, H., Rostedt, A., Olin, M., Yli-Ojanperä, J., Nousiainen, P., Kousa, A. & Maso, M. D. (2017). Traffic is a major source of atmospheric nanocluster aerosol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vsk. 114(29), s. 7549–7554.
- Salma, I., Borsos, T., Aalto, P. & Kulmala, M. (2011). Time-resolved number concentrations and size distribution of aerosol particles in an urban road tunnel. *Boreal Environment Research*, vsk. 16(4), s. 262 – 272.
- Schuster, G., Dubovik, O. & Holben, B. (2006). Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Sehmel, G. (1973). Particle resuspension from an asphalt road caused by car and truck traffic. *Atmospheric Environment* (1967), vsk. 7(3), s. 291 – 309.
- Seinfeld, J. & Pandis, S. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics; From Air Pollution to Climate Change*. John Wileys & Sons, Inc.
- Sternbeck, J., Sjödin Åke & Andréasson, K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment*, vsk. 36(30), s. 4735–4744.
- Stier, P., Seinfeld, J. H., Kinne, S. & Boucher, O. (2007). Aerosol absorption and radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 7(19), s. 5237–5261.

Strawa, A., Kirchstetter, T., Hallar, A., Ban-Weiss, G., McLaughlin, J., Harley, R. & Lunden, M. (2010). Optical and physical properties of primary on-road vehicle particle emissions and their implications for climate change. *Journal of Aerosol Science*, vsk. 41(1), s. 36 – 50.

Takemura, T., Nakajima, T., Dubovik, O., Holben, B. & Kinne, S. (2002). Singlescattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journey of Climate*, vsk. 15(4), s. 333–352.

Virtanen, A., Rönkkö, T., Kannosto, J., Ristimäki, J., Mäkelä, J. M., Keskinen, J., Pakanen, T., Hillamo, R., Pirjola, L. & Hämeri, K. (2006). Winter and summer time size distributions and densities of traffic-related aerosol particles at a busy highway in Helsinki. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 6(9), s. 2411–2421.

Vogt, M., Nilsson, E. D., Ahlm, L., Mårtensson, E. M. & Johansson, C. (2011). The relationship between 0.25–2.5 μm aerosol and CO_2 emissions over a city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vsk. 11(10), s. 4851–4859.

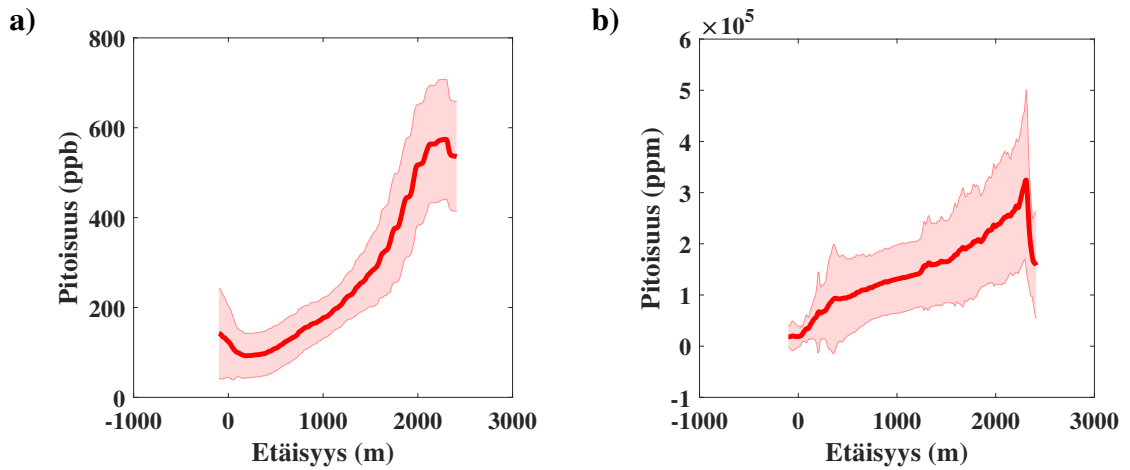
Watson, J. G. (2002). Visibility: Science and Regulation. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vsk. 52(6), s. 628–713.

Weijers, E., Khlystov, A., Kos, G. & Erisman, J. (2004). Variability of particulate matter concentrations along roads and motorways determined by a moving measurement unit. *Atmospheric Environment*, vsk. 38(19), s. 2993 – 3002.

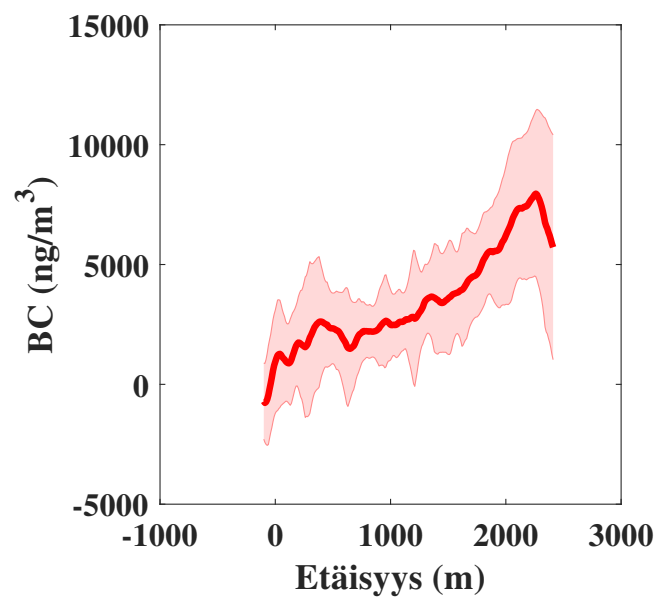
Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B. & Baltensperger, U. (2003). Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *Journal of Aerosol Science*, vsk. 34(10), s. 1445 – 1463.

Xu, J., Tao, J., Zhang, R., Cheng, T., Leng, C., Chen, J., Huang, G., Li, X. & Zhu, Z. (2012). Measurements of surface aerosol optical properties in winter of Shanghai. *Atmos. Res*, vsk. 76, s. 221–226.

LIITE A: $\text{NO}_2\text{:N}$, $\text{CO}_2\text{:N}$ JA BC:N KESKIHAJONTA



Kuva 33. Mobiililaboratoriomittauksissa 21.2. B-tunnelissa mitatun a) NO_2 :n b) CO_2 :n pitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta



Kuva 34. Mobiililaboratoriomittauksissa 21.2. B-tunnelissa mitatun BC-konenstraation keskiarvo ja keskihajonta